Les images de la Terre

Cosmographie, géodésie, topographie et cartographie à travers les siècles

Acteurs de la Science

collection dirigée par
Richard Moreau, professeur émérite à l'université de Paris XII,
et Claude Brezinski, professeur émérite à l'université de Lille I

La collection Acteurs de la Science comprend des études sur les acteurs de l'épopée scientifique humaine, des inédits et des réimpressions de textes écrits par les savants qui firent la Science, des débats et des évaluations sur les découvertes les plus marquantes et sur la pratique de la Science.

Titres parus

Jean Boulaine, Richard Moreau, Pierre Zert, *Éléments d'histoire agricole et forestière*, 2010.

Thomas de Vittori, *Les notions d'espace en géométrie. De l'Antiquité à l'Âge Classique*, 2009.

René Vallery-Radot, *La Vie de Pasteur*, Préface par Richard Moreau, 2009.

Jean Dominique Bourzat, *Une dynastie de jardiniers et de botanistes : les Richard. De Louis XV à Napoléon III*, 2009.

Nausica Zaballos, *Le système de santé Navajo. Savoirs rituels et scientifiques de 1950 à nos jours*, 2009.

Roger Teyssou, *Une histoire de l'ulcère gastro-duodénal. Le pourquoi et le comment*, 2009.

Robert Locqueneux, *Henri Bouasse. Réflexion sur les méthodes et l'histoire de la physique*, 2009.

Etienne Mollier, *Mémoires d'un inventeur. De la photographie 35 mm au rétroprojecteur (1876-1962)*, Préface et épilogue de Suzanne Séjournant-Mollier, 2009.

Jérôme Janicki, *Le drame de la thalinomide. Un médicament sans frontières (1956-2009)*, 2009.

Yves Delange, *Plaidoyer pour les Sciences naturelles. Dès l'enfance, faire aimer la nature et la vie*, Introduction de Richard Moreau, 2009.

Marie-Thérèse Pourprix, *Des Mathématiciens à la Faculté des Sciences de Lille (1854-1971)*, 2009.

Pierre de Félice, *Histoire de l'Optique*, 2009.

Roger Teyssou, *Dictionnaire des médecins, chirurgiens et anatomistes de la Renaissance*, Préface de Richard Moreau, 2009.

Alexis et Dominique Blanc, *Personnages célèbres des Côtes d'Armor*, 2009.

Jacques Arlet, *La Fayette, gentilhomme d'honneur*, 2008.

Suite des titres de la collection en fin de volume.

Claude Brezinski

Les images de la Terre

Cosmographie, géodésie, topographie et cartographie à travers les siècles

L'Harmattan

Du même auteur :

Accélération de la Convergence en Analyse Numérique, Lecture Notes in Mathematics, vol. 584, Springer-Verlag, Heidelberg, 1977.

Algorithmes d'Accélération de la Convergence. Étude Numérique, Éditions Technip, Paris, 1978.

Padé-Type Approximation and General Orthogonal Polynomials, ISNM, vol. 50, Birkhäuser-Verlag, Basel, 1980.

Introduction à la Pratique du Calcul Numérique, Dunod, Paris, 1988.

Algorithmique Numérique, Ellipses, Paris, 1988.

History of Continued Fractions and Padé Approximants, Springer-Verlag, Berlin, 1991.

A Bibliography on Continued fractions, Padé Approximation, Sequence Transformation, and Related Subjects, Prensas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza, 1991.

Extrapolation Methods. Theory and Practice (avec M. Redivo-Zaglia), North-Holland, Amsterdam, 1991.

Biorthogonality and its Applications to Numerical Analysis, Marcel Dekker, New York, 1992.

El Oficio de Investigador, Siglo XXI de España Editores, Madrid, 1993.

Projection Methods for Systems of Equations, North-Holland, Amsterdam, 1997.

Initiation à la Programmation Linéaire et à l'Algorithme du Simplexe, Ellipses, Paris, 2002.

Computational Aspects of Linear Control, Kluwer, Dordrecht, 2002.

Méthodes Numériques Directes de l'Algèbre Matricielle (avec M. Redivo–Zaglia), Ellipses, Paris, 2004.

Histoires de Sciences. Inventions, Découvertes et Savants, L'Harmattan, Paris, 2006.

Méthodes Numériques Itératives. Algèbre Linéaire et Non Linéaire (avec M. Redivo–Zaglia), Ellipses, Paris, 2006.

Comment l'Esprit Vient aux Savants, L'Harmattan, Paris, 2007.

Ampère, Arago et Fresnel. Trois hommes, trois savants, trois amis. 1775 - 1853, Hermann Éditeurs, Paris, 2008.

5-7, rue de l'Ecole polytechnique ; 75005 Paris

http://www.librairieharmattan.com
diffusion.harmattan@wanadoo.fr
harmattan1@wanadoo.fr

ISBN : 978-2-296-11722-8
EAN : 9782296117228

Avant-Propos

La *géodésie* a pour objet la détermination mathématique de la forme de la Terre. Les observations géodésiques conduisent à des données numériques : forme et dimensions de la Terre, coordonnées géographiques des points, altitudes, déviations de la verticale, longueurs d'arcs de méridiens et de parallèles, etc.

La *topographie* est la sœur de la géodésie. Elle s'intéresse aux mêmes quantités, mais à une plus petite échelle, et elle rentre dans des détails de plus en plus fins pour établir des cartes à différentes échelles et suivre pas à pas les courbes de niveau. La topographie comporte la *planimétrie*, c'est-à-dire le levé des plans, et le *nivellement* qui prend en compte le relief et les irrégularités du terrain. L'*arpentage* consiste, plus spécifiquement, en la mesure des superficies ; il est donc essentiel dans les ventes de terrains et les problèmes de successions. Autrefois, ce mot était utilisé comme synonyme de topographie. La *topométrie* constitue la partie mathématique de la topographie.

La *cartographie* proprement dite est l'art d'élaborer, de dessiner les cartes, souvent avec un souci artistique. On peut représenter une portion plus ou moins grande de la Terre, avec une échelle plus ou moins grande et donc plus ou moins de détails. La Terre dans son ensemble peut être figurée sur un globe ou sur une carte plane. Un planisphère en est une vue d'un seul tenant, tandis qu'une mappemonde fait apparaître séparément les deux hémisphères, chacun dans un cercle.

Mais, avant tout, il est nécessaire d'être capable de repérer de façon précise tout point à la surface du globe et, donc, de savoir le mesurer. Pour cela, on fait appel à la *cosmographie*. Ce sera l'objet du premier Chapitre.

Bien qu'apparentée à ces sciences, et même longtemps indistincte de la cartographie, la *géographie* consiste plus spécifiquement à observer et à décrire notre environnement physique et ses modifications. Nous

n'en traiterons pas ici. Mais, de toute façon, il est bien évident que ces différentes sciences s'entrelacent étroitement.

L'homme, même au temps de la préhistoire, s'est toujours déplacé sur Terre. Il n'est jamais resté au même endroit. Il s'est vite aperçu que la Terre sur laquelle il vivait était grande, très grande. Il lui fallait pouvoir s'y repérer, ne serait-ce que pour être capable de revenir à son point de départ. Il avait donc besoin de dessiner le chemin qu'il avait pris, les étendues qu'il avait traversées. Il avait besoin de cartes. Mais, pour pouvoir en établir, des repères étaient nécessaires. En d'autres termes, il avait besoin d'un système de coordonnées. Le ciel lui en fournissait un. Mais, pour cela, il fallait comprendre comment cela fonctionnait, comment il se faisait que les astres revenaient périodiquement à la même place, le Soleil en premier. Il lui fallait entreprendre des études de cosmographie. Mais cela ne suffisait pas. Vite, il s'aperçut que la Terre n'était pas plate. Quelle forme avait-elle donc ? Puis, quand il comprit que c'était une sphère, ou à peu près, il fallut la mesurer. Là encore, il eut recours au ciel et ce furent les débuts de la géodésie. Quand la forme de la terre fut fixée, il fallut la mesurer, la trianguler pour obtenir des distances et des angles. Il fallut également évaluer les hauteurs pour en comprendre le relief. Enfin, on allait pouvoir commencer à la cartographier avec plus ou moins de précision. L'aboutissement.

La cartographie, avec tous les efforts qu'elle a nécessités, est une grande aventure de l'humanité. Elle s'étend sur des siècles et même des millénaires. C'est cette aventure que je veux faire partager ici en montrant ses différents aspects tant scientifiques qu'humains ainsi que l'enchaînement des idées. Je veux aussi montrer qu'elle a suscité des améliorations dans diverses autres branches du savoir et qu'elle a également bénéficié de leurs apports. Naturellement tous les détails ne pourront pas être donnés (il n'est pas question ici de transformer le lecteur en spécialiste, ce que je ne suis d'ailleurs pas), toutes les cartes ne pourront pas être décrites, tous le protagonistes ne pourront pas être présentés. Les spécificités de cas particuliers (comme la cartographie du Mont-Blanc) seront abordées. Le développement de ces techniques en France sera particulièrement mis en avant. Enfin, les hommes auront, dans ce livre, une place de choix. Il ne faut pas oublier que, sans les efforts de chacun d'eux, rien n'aurait peut-être été possible.

Observer, interpréter, mesurer, dessiner pourrait être un second sous-titre de cet ouvrage.

Avant de terminer, une mise au point me tient à cœur. Il y eut d'abord les calculettes individuelles ; on n'avait plus besoin de savoir compter. Vinrent ensuite les ordinateurs avec leurs logiciels de traitement de texte ; on n'avait plus besoin de savoir tenir un stylo. Maintenant on a le GPS et il n'est plus nécessaire de savoir lire une carte. Qu'inventera-t-on demain ? Quand les progrès technologiques, qui nous font peu à peu oublier les bases de notre culture, s'arrêteront-ils ? Nous sommes en train de perdre notre indépendance et de devenir prisonniers de ce développement. Naturellement, ces innovations ont du bon, mais n'oublions jamais que nous sommes avant tout des hommes et que ce sont les cerveaux de celles et ceux qui nous ont précédés qui ont bâti le monde dans lequel nous vivons. La machine ne doit pas faire disparaître la civilisation.

Le spécialiste ne trouvera ici rien d'inédit. Je n'ai cherché qu'à faire partager au plus grand nombre une branche de l'histoire des sciences et des techniques et à faire parcourir ce chemin à d'autres après l'avoir moi-même sillonné.

Les sources documentaires utilisées sont données dans la bibliographie. Certaines sont signalées dans le texte par (voir Biblio : nom auteur). Les illustrations proviennent d'internet et sont toutes libres de reproduction.

Genèse et remerciements

J'en suis venu à m'intéresser à la cartographie à la suite d'une étude biographique que j'avais faite il y a quelques années sur l'inventeur d'une méthode de résolution des systèmes d'équations linéaires qui est très connue des mathématiciens appliqués : la méthode de Cholesky. Il y a une vingtaine d'années, on ne savait rien de celui-ci. Puis quelques indications apparurent ; il était né en 1873, était français, polytechnicien, officier du Service géographique de l'armée et avait été tué en 1918, un mois environ avant la fin de la guerre. D'après la loi française, les archives personnelles sont ouvertes 120 ans après la naissance des intéressés. En 1993, je me rendis donc au fort de Vincennes afin de consulter les archives d'André Cholesky et je fis paraître une première biographie sur lui. Quel ne fut pas mon étonnement quand je reçus, en janvier 2004, une lettre d'un certain Michel Gross qui était le petit fils de Cholesky. Il avait pu me contacter grâce à un site web dédié à Cholesky et qui avait été mis en place par un collègue de l'univer-

sité de la Réunion, Yves Dumont. Monsieur Gross venait de déposer aux archives de l'École polytechnique les documents de Cholesky que possédait sa famille. Il me demandait de l'aider à classer ces papiers. Et c'est ainsi que nous découvrîmes le manuscrit inédit et inconnu de tous où Cholesky expliquait sa méthode. À l'occasion de cette découverte, je me livrai également, pour des mathématiciens, à une analyse de la méthode de Cholesky et des méthodes qui servent à résoudre le même type de problèmes. Devant faire paraître, à la suite de notre classement des archives (l'aide de Claudine Billoux, archiviste de l'École polytechnique, nous fut précieuse), un article dans le Bulletin de la Société des amis de la bibliothèque de l'École polytechnique, je me suis intéressé de plus près au travail d'ingénieur géographe de Cholesky et j'écrivis, pour ce Bulletin, un article sur l'histoire de la géodésie, de la topographie et de la cartographie. Dans ces archives, nous trouvâmes également d'autres manuscrits inédits de Cholesky et Dominique Tournès, professeur à l'université de la Réunion, est en train de publier son cours de *Calcul graphique*. Monsieur Jean-Luc Dron m'a aiguillé vers d'autres documents concernant Cholesky et vers les sites internet décrivant les diverses opérations de la Grande Guerre. J'exprime ma reconnaissance à toutes ces personnes.

Je remercie Monsieur François Cortet dont les remarques critiques sur la science grecque m'ont amené à vérifier et approfondir certains points délicats. J'ai pu emprunter de larges extraits de certaines de mes publications grâce aux autorisations qui m'ont été aimablement fournies. C'est ainsi que je suis reconnaissant à Messieurs Alexandre Moatti et Jean-Paul Devilliers (Bulletin de la Société des amis de la bibliothèque de l'École polytechnique) et à Monsieur Denis Pryen (Éditions L'Harmattan).

Une partie de ce travail a été réalisée lors d'un séjour de trois mois à l'université de Padoue sur une chaire financée par la Fondazione CARIPARO que je remercie pour son soutien. J'exprime mes plus vifs remerciements à l'université de Padoue pour m'avoir élu à cette chaire et à ma collègue Michela Redivo-Zaglia pour avoir défendu ma candidature à ce poste devant les différentes instances universitaires. Son aide m'a également été précieuse, voire indispensable, en de très nombreuses occasions et, en particulier, pour la mise en page finale du texte et des figures. Qu'elle en soit remerciée. Je remercie également Sofia Talas, conservatrice du Musée d'histoire de la physique de l'université de Padoue, pour m'avoir mis sur la voie de documents intéressants et Jean-Pierre Bosio

pour m'avoir transmis des notes sur le sextant. Merci à Manuel Luque pour m'avoir autorisé à utiliser ses travaux sur la projection de Collignon, à Benet Salway pour son article sur la Table de Peutinger et à Richard Talbert qui a bien voulu me fournir des indications sur son livre à paraître sur ce sujet. Je remercie Friedrich Simacher, du Département des manuscrits et livres rares de la Bibliothèque nationale autrichienne, qui m'a indiqué comment accéder à un fac-similé de cette Table.

Je remercie le professeur Richard Moreau pour ses conseils concernant la mise en page définitive du texte, ainsi que toute l'équipe de L'Harmattan pour sa disponibilité, sa gentillesse, son efficacité et son professionnalisme. Julie Lecomte s'est chargée, en particulier, de la chasse finale aux coquilles qui subsistent dans tout texte malgré l'attention que l'on peut y apporter.

Enfin, je remercie vivement ma fille, Christine Brezinski, qui a assuré l'ultime relecture, tâche ingrate s'il en est. Ses remarques m'ont également forcé à fournir des explications supplémentaires de certains termes scientifiques, d'où l'utilité des littéraires !

L'illustration de la couverture est tirée de la Table de Peutinger. Elle représente Marseille et ses environs.

Un peu de cosmographie

De même que ceux d'*Instruction civique*, les cours de *Cosmographie* (qui avaient toujours été régulièrement enseignés depuis le XIIIe siècle) ont depuis longtemps disparu des programmes de nos collèges et lycées. Les premiers formaient les citoyens d'un pays, les seconds les habitants du monde. On ne peut que regretter leur suppression. Ils faisaient partie du bagage culturel que chacun se devait de posséder.

La géodésie, la topographie et la cartographie nécessitent le repérage de points à la surface de la Terre. Qu'en est-il ? Bien que cela ait été bien long à comprendre et surtout à faire admettre, chacun sait maintenant que la Terre tourne autour du Soleil et autour d'un axe passant par les pôles Nord et Sud et que le grand cercle qui lui est perpendiculaire s'appelle l'*équateur*. Chaque point sur Terre est repéré par deux coordonnées géographiques (en la supposant parfaitement sphérique). D'abord sa *latitude* qui est l'angle entre le plan de l'équateur et la demi-droite issue du centre de la Terre et passant par ce point. Elle varie entre 0° à l'équateur et 90° aux pôles et l'on parle de latitude nord ou sud selon le pôle dont il s'agit. On appelle *parallèle* tout cercle qui joint des lieux ayant la même latitude. Un grand cercle qui passe par les deux pôles s'appelle un *méridien*. La *longitude* d'un lieu est l'angle entre le demi-plan contenant l'axe de la Terre et un méridien arbitraire choisi comme origine (actuellement celui de Greenwich) et le demi-plan contenant l'axe de la Terre et le méridien passant par ce lieu. La longitude est comptée de 0° à 180° à partir du méridien de Greenwich en allant vers l'ouest ou vers l'est. Un réseau de parallèles et de méridiens se coupant à angle droit s'appelle un *canevas*. Sur un parallèle, une différence de longitude d'une seconde d'angle correspond à une longueur qui varie selon la latitude (1.855,32 m à l'équateur, nulle aux pôles). Sur un méridien, une différence de latitude donnée correspond à une longueur fixe sur la sphère. Mais puisque, comme nous le verrons, la Terre n'est pas une

sphère mais un ellipsoïde, une seconde d'angle correspond à 1.842,78 m à l'équateur et à 1.861,67 m aux pôles. Ces deux valeurs sont confondues pour donner le mille marin international qui vaut 1.852 m. Pour déterminer l'angle d'un certain arc de méridien, on mesure la hauteur d'une étoile de référence (c'est-à-dire l'angle qu'elle fait avec l'horizon dans le plan du méridien) aux deux extrémités de l'arc et la différence de latitude en fournit l'amplitude.

Mais la géodésie, la topographie et la cartographie font également appel à une vision globale des différents mouvements de notre planète. Il m'a donc semblé nécessaire de rappeler ici certaines notions de cosmographie (étymologiquement : description de l'Univers), ne serait-ce que pour fixer un vocabulaire qui nous sera utile par la suite. La cosmographie ne se réfère à aucune cosmologie, partie de l'astronomie qui traite de la structure et de l'évolution de l'Univers considéré comme un tout.

Dès les premières heures de l'humanité, l'homme a tourné son regard vers le ciel. Il a du être surpris. Quelle était cette boule lumineuse et dispensatrice de chaleur ? Pourquoi changeait-elle de place au cours de la journée, pourquoi disparaissait-elle la nuit et qu'elle était cette boule blanchâtre qui la remplaçait et changeait de forme selon les jours ? Qu'étaient ces points plus ou moins lumineux et qui, eux aussi, changeaient de place au cours de la nuit pour revenir au même endroit, ou presque, le lendemain ? Qu'est-ce que tout cela signifiait ? Que de questions, que de questions difficiles à résoudre et comment le faire ? L'homme s'est toujours posé des questions sur la nature qui l'entoure et il s'en pose encore. Mais l'homme a toujours été curieux, il a toujours été à la recherche d'explications. C'est ainsi que la science est née.

Alors, que voit-on d'abord ? La nuit, la voûte céleste est parsemée de points brillants, la plupart fixes (les *étoiles*), mais dont certains semblent cependant en mouvement (les *planètes*). Si un observateur de l'hémisphère Nord regarde vers le sud (donné par la direction du Soleil à midi), il voit défiler le Soleil et les étoiles de sa gauche vers sa droite, c'est-à-dire de l'est vers l'ouest, dans le *sens rétrograde*, celui de rotation des aiguilles d'une montre. Mais il ne s'agit là que d'un mouvement apparent. En fait, c'est la Terre qui tourne, et dans l'autre sens. Ainsi, si l'on se place au-dessus du pôle Nord, la Terre tourne dans le *sens direct*, autrement dit dans le *sens trigonométrique* des mathématiciens. Il est l'inverse de celui de rotation des aiguilles d'une montre.

Les étoiles s'élèvent d'abord dans le ciel, atteignent une hauteur maximale (le point de *culmination*), puis décroissent jusqu'à disparaître,

comme le Soleil qui est une étoile parmi d'autres. De manière équivalente, si l'observateur est tourné vers le nord, les étoiles vont maintenant de droite à gauche, mais naturellement toujours de l'est vers l'ouest, puisque l'on s'est retourné. Cependant certaines d'entre elles n'ont ni lever ni coucher. Elles restent toujours visibles (c'est-à-dire au-dessus de l'horizon, dont la définition exacte sera donnée ultérieurement) et passent deux fois par jour dans un certain plan, le *plan méridien*, une fois à leur culmination et une seconde fois à leur point le plus bas. La demi-somme de leur plus grande et de leur plus basse hauteur est constante, pour une position donnée de l'observateur (sa latitude). Ce sont les étoiles *circumpolaires.* L'une d'elles a d'ailleurs une hauteur fixe voisine de cette demi-somme et elle reste sensiblement à la même hauteur durant toute la nuit ; c'est l'*étoile Polaire* (*Alpha Ursae Minoris* de la constellation de la Petite ourse). Plus une étoile est voisine de l'étoile Polaire et plus le cercle qu'elle décrit est petit. Cependant, elles mettent toutes exactement le même temps pour effectuer un tour complet. D'autres étoiles continuent à se lever puis à disparaître. La bissectrice de l'angle des positions où chacune d'elles passe à une certaine hauteur, une fois en montant et la seconde fois en descendant, est de nouveau le plan méridien qui reste le même quelle que soit la hauteur choisie pour la mesure et quelle que soit l'étoile. Les étoiles circumpolaires australes restent toujours invisibles dans l'hémisphère Nord.

L'observateur remarque aussi que les figures que forment certaines étoiles (les *constellations* du Zodiaque, au nombre de 88 selon l'Union astronomique internationale) semblent conserver toujours le même aspect, qu'elles semblent indéformables même lors d'une observation prolongée, que les étoiles qui les composent sont liées les unes aux autres. Il a donc l'impression que les étoiles sont fixées à une immense sphère, la *sphère céleste* (autrefois appelée *sphère des fixes*), dont la Terre occupe le centre et que cette sphère tourne autour d'elle selon un mouvement constant appelé *mouvement diurne.* Ce mouvement est dû à la rotation de la Terre sur elle-même ; il s'effectue en 23 h 56 m 4s. Mais, si l'on se repère par rapport au Soleil, il faut 24 h pour que celui-ci se retrouve dans la même direction. En effet, durant sa rotation journalière, la Terre s'est déplacée dans son mouvement de révolution autour du Soleil. Signalons que la rotation de la Terre sur elle-même se ralentit à long terme, à cause de l'attraction entre la Lune et le Soleil et qu'elle est perturbée par ses constituants internes (noyau, manteau) et externes (atmosphère, frottement des marées prévu par Kant). C'est pour tenir compte de ce

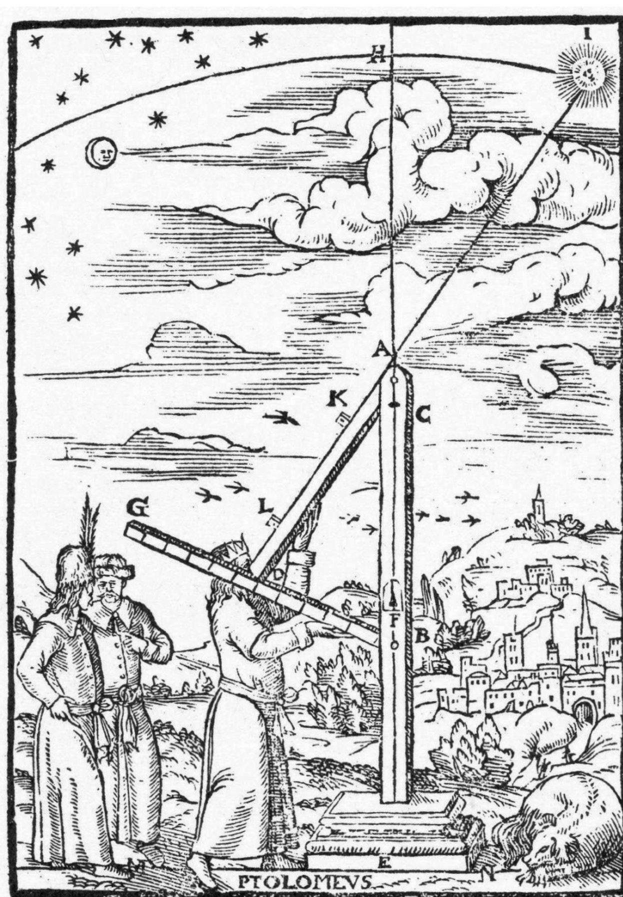
phénomène qu'on a dû rallonger d'une seconde la minute comprise entre 0 h 59 et 1 h dans la nuit du 1er janvier 2009.

Faisons un petit intermède. Il fallut attendre le XIXe siècle pour que la rotation de la Terre soit scientifiquement prouvée. C'est la célèbre expérience du pendule de Léon Foucault (Paris, 18 septembre 1819 - Paris, 11 février 1868). Le plan dans lequel un pendule (un fil à plomb suspendu, écarté de sa position d'équilibre et abandonné à lui-même) se balance ne change pas, même si l'on fait tourner l'appareillage qui le soutient. En 1852, Foucault suspend donc au plafond du Panthéon de Paris un pendule de 77 m de long, lesté d'une boule de 28 kg, de 18 cm de diamètre et munie d'un stylet. Un petit tas de sable est posé au sol et le stylet y trace un sillon à chaque oscillation. Mais le sillon n'est jamais tout à fait le même car le tas de sable est entraîné par la rotation de la Terre, C.Q.F.D. La vitesse de rotation terrestre est relativement faible ; en effet, un point sur l'équateur se déplace de 465 mètres par seconde et cette distance diminue bien entendu jusqu'à s'annuler lorsque l'on se rapproche des pôles. Ainsi, à Paris, elle n'est plus que de 365 mètres.

Aucune notion de distance, de perspective, de relief, ne se dégage de l'observation du ciel. Nous n'avons pas nous-mêmes la sensation d'être en mouvement. L'idée de la fixité de la Terre s'impose donc. Il ne s'agit là, bien sûr, que d'une apparence. Puisque la position de chaque étoile dans le ciel dépend de la position sur Terre de l'observateur, nous allons associer à chacun d'eux une sphère de rayon unité, dont son œil est le centre. C'est la *sphère locale*. Chaque objet astronomique est repéré par sa position sur cette sphère. Il nous faut donc préciser un système de coordonnées.

La verticale est déterminée par la direction du fil à plomb au repos. La verticale ascendante perce la sphère céleste au *zénith*. Le point qui lui est diamétralement opposé sur cette sphère est le *nadir*. La surface perpendiculaire à la verticale est le *plan de l'horizon*, qui est tangent à la surface terrestre. Il peut être matérialisé, en prenant certaines précautions, par la surface libre d'un liquide en équilibre (en général du mercure) et l'horizontalité d'une tige ou d'une surface peut se vérifier grâce à un niveau à bulle. Le demi-grand cercle qui passe par le zénith, le nadir et une étoile donnée s'appelle le *vertical de l'étoile*. La *hauteur* de l'étoile est l'angle formé, dans ce plan, par sa direction avec le plan de l'horizon. Elle peut se mesurer à l'aide d'un appareillage très simple, le *triquetrum*, formé de trois tiges en bois articulées, ou avec un autre

instrument, l'*arbalète*, comportant deux règles de visée perpendiculaires. Puisque l'horizon dépend du lieu où l'on se trouve (de la latitude), la hauteur d'un astre indique sa position par rapport à l'observateur et non sa véritable position sur la sphère céleste. Le lieu géométrique le long duquel on voit une étoile sous une même hauteur est un cercle à la surface de la Terre. Pour le Soleil, à grande échelle et lorsque cette hauteur est inférieure à 80°, une portion de ce cercle est assimilable à une droite dite *droite de hauteur*. Comme nous le verrons, elle a son importance dans les observations effectuées en mer à l'aide d'un sextant.



It is made of 3. peaces, beyng 4. ſquare: As in the Picture where A. F. is the firſt peace or rule.
A.D. The ſeconde.
G.D. the third rule.
E. The Foote of the ſtaffe.
C.F. The Plumrule.
C.B. The ioyntes, in which the ſecond & third Rulers are moued.
K.L. The ſighte holes.
I. The Sonne.
H. The Zenit, or verticall pointe.
M. N. The Noone-ſtead Lyne.

Triquetrum

L'axe autour duquel s'effectue la rotation de la sphère céleste est l'*axe du monde*. Il passe par les pôles Nord et Sud terrestres et perce la sphère céleste en deux points : le *pôle boréal*, qui est voisin de l'étoile Polaire, et le *pôle austral*. L'*équateur céleste* est le grand cercle de la sphère qui lui est perpendiculaire. C'est la projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste. La *déclinaison* d'un astre est indépendante du lieu d'observation ; c'est l'angle entre sa direction et celle de l'équateur céleste. Son complément à 90° s'appelle la *distance polaire*. La hauteur donne directement la déclinaison si l'on connaît la latitude du lieu d'observation. Inversement, connaissant la déclinaison d'un astre, on peut en déduire la latitude ; c'est ainsi que l'on fait le point en mer. L'*azimut* est l'angle, dans le plan de l'horizon, entre le vertical de l'étoile et le vertical d'un repère terrestre quelconque que l'on a choisi. Il se compte en degrés, dans le sens rétrograde, à partir de ce repère. La hauteur et l'azimut sont les coordonnées horizontales de l'étoile. Elles sont mesurées à l'aide d'un *théodolite* dont il n'est pas utile de décrire ici le fonctionnement. Elles permettent de préciser la position d'un astre par rapport au plan de l'horizon et au méridien d'un lieu donné.

Donnons quelques explications sur le choix du degré (d'angle) comme unité de mesure. Par définition, le mètre est la dix-millionième partie du quart de méridien terrestre. En supposant qu'il est de 10.000 km, un degré correspond donc à sa quatre-vingt-dixième partie, soit 111 km, 111 m et 11 cm, etc. Une seconde d'angle est la soixantième partie de cette distance, soit 1.852 mètres ; c'est le *mille marin*. C'est un nombre rationnel, c'est-à-dire qu'il s'exprime comme une fraction exacte de la longueur du méridien. Pourquoi les navigateurs et les astronomes n'ont-ils pas adopté une division décimale, pourquoi ont-ils divisé le quart de cercle en 90 degrés au lieu de 100, ce qui aurait grandement simplifié les calculs puisque cette centième partie, appelée le *grade*, aurait valu 100 km ? La fautive est la géométrie. En effet, le seul polygone que l'on peut facilement inscrire dans un cercle est l'hexagone. Pour cela, il suffit, avec un compas, de reporter le diamètre sur la circonférence. On revient au point de départ après avoir effectué six fois cette opération ainsi que nous l'avons appris à l'école primaire. Si la circonférence correspond à 360°, sa sixième partie correspond à 60°, alors qu'en divisant 400 grades par 6 on obtient un nombre irrationnel, qui ne peut pas s'exprimer sous forme d'une fraction. Le système décimal est plus commode pour les calculs, et il est employé par les topographes, alors que le système sexagésimal (système de numération qui utilise 60 comme base) est plus

simple pour les astronomes et les navigateurs. Signalons que le mile anglo-saxon de 1.610 mètres n'a absolument aucun rapport que ce soit avec les dimensions de la Terre.

En un an, le Soleil décrit un grand cercle de la sphère céleste. Mais, comme l'axe de la Terre est incliné (les directions du pôle boréal et du zénith forment un angle), ce grand cercle coupe l'équateur céleste en deux points, le nœud ascendant quand il passe au-dessus, c'est-à-dire de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord (c'est l'*équinoxe de printemps*, environ le 21 mars), aussi appelé *point vernal* et noté par la lettre grecque γ, et le nœud descendant quand il passe en dessous (c'est l'*équinoxe d'automne*, environ le 22 septembre). Ce grand cercle est l'*écliptique*, qui est, en première approximation, le plan de l'orbite terrestre ou encore de l'orbite apparente du Soleil vue de la Terre. Plus précisément, c'est le plan de l'orbite héliocentrique (c'est-à-dire dont le Soleil est le centre) du barycentre du système formé par la Terre et la Lune, point qui se trouve à l'intérieur de notre planète. Il n'est pas question de décrire ici les mouvements lunaires qui sont aussi complexes que ceux de la Terre. Disons seulement que l'orbite de la Lune est une ellipse, mais inclinée sur l'écliptique de $5°14'$ en moyenne. Le centre de la Terre ne se situe donc pas en général sur l'écliptique, mais il la traverse chaque fois que les plans des deux orbites se croisent. C'est cette inclinaison qui explique pourquoi les éclipses solaires et lunaires ne se produisent pas chacune une fois par mois. Notons que la connaissance de la date des éclipses passées présente un grand intérêt historique. C'est en effet grâce à elles que l'on peut retrouver l'époque à laquelle se sont produits certains événements historiques relatés dans les récits des Anciens.

Les équinoxes sont les points de l'orbite terrestre situés sur la ligne des équinoxes qui est la droite d'intersection de l'écliptique et du plan de l'équateur céleste. Au moment des équinoxes, il y a égalité entre les durées du jour et de la nuit (d'où leur nom). La *longitude céleste* d'un astre est l'arc de l'écliptique qui est compris entre le point vernal (qui sert d'origine) et l'intersection avec l'écliptique du cercle de latitude de l'astre. Il est compté dans le sens direct. Les *solstices* sont les deux points de l'orbite terrestre situés sur la ligne des solstices, qui est la droite du plan de l'écliptique perpendiculaire à la ligne des équinoxes. Dans l'hémisphère Nord, les jours sont les plus longs au solstice d'été (vers le 21 juin), tandis qu'ils sont les plus courts à celui d'hiver (vers le 21 décembre). Cela tient à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. L'équateur céleste fait un angle d'environ $23°26'$ avec le plan de

l'écliptique ; c'est également l'angle entre les directions du pôle boréal et du zénith. Cet angle varie d'ailleurs au cours du temps entre 22° et 24°. On ne voit le Soleil passer au zénith, c'est-à-dire être perpendiculaire à la surface terrestre, qu'entre le tropique du Cancer, situé à la latitude nord de 23°26′, et le tropique du Capricorne, qui se trouve à la même latitude mais au sud de l'équateur. Au-delà de la latitude de 66°34′ nord, le *cercle polaire arctique*, on peut observer, en été, le Soleil de minuit, alors que ce phénomène se produit, en hiver, au-delà de la même latitude sud, le *cercle polaire antarctique.* Cette inclinaison (presque constante) de l'axe terrestre par rapport à l'écliptique est la cause des saisons. Si l'on regarde l'orbite terrestre de sorte que le solstice d'été soit situé à gauche et celui d'hiver à droite, on voit la Terre tourner dans le sens direct et son axe rester constamment incliné vers la droite ; il pointe vers l'étoile Polaire. Par conséquent, quand l'hémisphère Nord est penché vers le Soleil, donc plus près de lui (ce qui se produit quand La Terre est dans la partie gauche de son orbite telle que nous avons décidé de la regarder), c'est l'été dans celui-ci alors que l'hiver sévit dans l'autre. Puis les saisons s'inversent.

Le *cercle horaire* d'un astre est le grand cercle de la sphère céleste perpendiculaire à l'équateur et passant par l'objet céleste. Il passe donc également par les pôles célestes et l'astre. De même que la longitude terrestre est l'angle entre le méridien de ce lieu et un méridien de référence, l'*ascension droite* d'un astre est l'angle, mesuré en heures, minutes et secondes de *temps sidéral*, entre le cercle horaire passant par le point vernal, qui sert d'origine, et celui passant par l'astre. Une heure équivaut à $360°/24 = 15°$. La déclinaison et l'ascension droite d'un astre forment ses *coordonnées équatoriales.* Contrairement à la hauteur et à l'azimut, ces coordonnées ne dépendent plus du lieu d'observation, mais elles sont liées à la ligne des pôles et à l'équateur qui restent les mêmes sur toute la Terre.

Le *méridien astronomique* d'un lieu est le plan déterminé par l'axe du monde et la verticale de ce lieu. Il coupe la sphère céleste suivant un grand cercle constitué de deux verticaux. L'un d'eux contient le pôle boréal et il coupe le plan de l'horizon en un point appelé *Nord* (azimut de 180°). Le point diamétralement opposé est le *Sud*, choisi comme origine des azimuts. En regardant vers le Nord, l'*Est* se trouve à droite (azimut de 270°) et l'*Ouest* à gauche (azimut de 90°). Ce sont les quatre *points cardinaux.* La hauteur du pôle boréal au-dessus de l'horizon est la demi-somme des hauteurs d'une étoile circumpolaire à ses passages

inférieurs et supérieurs. Elle est variable suivant le lieu. À Paris, elle est de 48°50′. C'est la *latitude*, comptée à partir de l'équateur terrestre dans chaque hémisphère. Celle-ci n'est pas constante. En effet, ni la verticale, ni les pôles terrestres ne sont rigoureusement fixes, comme l'a montré l'astronome allemand Karl Friedrich Küstner (Görlitz, 22 août 1856 - Mehlem, 15 octobre 1936) en 1888. Le pôle décrit une trajectoire compliquée encore mal expliquée, appelée *polhodie*, présentant des spires et qui s'inscrit dans un cercle dont le diamètre depuis 1900 n'a jamais excédé 21 mètres. Cette trajectoire se décompose en un mouvement circulaire dont la période varie entre 414 et 440 jours et un mouvement elliptique annuel. L'interférence de ces deux composantes induit de fortes variations d'amplitude des spires avec un cycle d'environ sept ans.

L'axe de rotation de la Terre n'est pas fixe en fonction du temps ; comme celui d'une toupie, il décrit un cône en 25.778 ans environ. Ce phénomène, découvert par Hipparque (Nicée, c. 190 av. J.-C. - 120 av. J.-C.), est appelé *précession des équinoxes*. Il est dû au couple de forces exercé par les marées de la Lune et du Soleil sur le renflement de la Terre à l'équateur. Ces forces tendent à amener l'excès de masse océanique présent à l'équateur vers le plan de l'écliptique. Comme la Terre est en rotation, ces forces ne peuvent modifier l'angle entre l'équateur et l'écliptique, mais provoquent un déplacement de l'axe de rotation de la Terre dans une direction perpendiculaire au couple et à cet axe, d'où le cône (d'angle au sommet de 47°) qu'il décrit. L'une des conséquences de cette précession est le changement de position des pôles célestes, des étoiles et du point vernal qui se déplacent en sens inverse de celui Soleil, d'où le nom donné au phénomène. Actuellement, l'étoile brillante la plus proche du pôle Nord céleste (le pôle boréal) est l'étoile Polaire ; elle en est distante de moins de 1° (une fois et demi le diamètre apparent de la Lune). Vers 3000 av. J.-C., c'était l'étoile *Alpha Draconis* qui indiquait ce pôle et, dans environ 12.000 ans, ça sera *Alpha Lyrae*. Comme l'orbite de la Lune est inclinée par rapport au plan de l'écliptique, celle-ci perturbe légèrement la précession en y ajoutant de petites oscillations dont la période est de 18 ans et 7 mois. C'est la *nutation*, un phénomène découvert en 1748 par l'astronome britannique James Bradley (Sherborne, Gloucestershire, mars 1693 - Chalford, Gloucestershire, 13 juillet 1762). À cause de la précession des équinoxes, le cycle des saisons (l'*année tropique* qui est de 365 j 5 h 48 m 45,2606 s) dure environ 20 minutes de moins que le temps mis par la Terre pour occuper la même position par rapport aux étoiles (l'*année sidérale* qui

est de 365 j 6 h 9 m 9 s). C'est cette différence qui est corrigée par les règles concernant les années bissextiles.

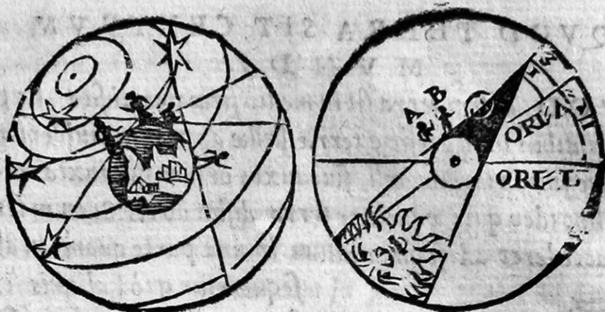
La Terre ne décrit pas un cercle autour du Soleil mais une ellipse dont celui-ci occupe l'un des foyers. La Terre se trouve au plus proche du Soleil en un point appelé le *périhélie* (vers le 3 janvier, à environ 147,1 millions de km du Soleil) et, au plus loin, à l'*aphélie* (vers le 5 juillet, à environ 152,1 millions de km). La distance entre ces deux points se nomme *grand axe* de l'ellipse. L'excentricité de cette ellipse (c'est-à-dire son aplatissement mesuré par le rapport de la distance de ses foyers à son grand axe) varie avec le temps (avec une période de l'ordre de 100.000 ans) ; il est compris entre 0 (cercle parfait) et $0,07$. Certains, comme le Serbe Milutin Milanković (Dalj, Empire Austro-Hongrois, maintenant Croatie, 28 mai 1879 - Belgrade, 12 décembre 1958), voient dans ces variations l'une des causes des grandes glaciations. Il en est de même des autres planètes solaires. Plus une planète est voisine du Soleil et plus sa période de révolution, son année, est longue. Ainsi l'année martienne est de 687 jours, tandis que celle de Vénus n'est que de 224,7 jours. D'après la seconde loi de Képler, les planètes couvrent des aires égales en des temps égaux ; par conséquent, elles vont plus vite quand elles sont proches de leur périhélie et moins vite au voisinage de leur aphélie. La trajectoire elliptique de chaque planète est perturbée par la présence des autres corps célestes. D'après la théorie de la relativité générale d'Einstein, l'espace est courbe au voisinage des masses matérielles et cette courbure engendre une avance dans le sens direct du périhélie des planètes. Ainsi, l'ellipse terrestre tourne-t-elle autour du Soleil en quelques 110.000 ans. De même, l'obliquité de l'écliptique n'est pas constante ; elle présente, à cause de la précession, des variations séculaires et, à cause de la nutation, des termes périodiques. Selon les positions de la Terre et d'une autre planète, le mouvement apparent de cette dernière s'effectue tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. La planète semble revenir en arrière, c'est le *mouvement rétrograde des planètes.* Ce phénomène est dû au fait que la Terre et la planète tournent autour du Soleil à des vitesses différentes. En un an, la terre parcourt environ 940 millions de kilomètres autour du Soleil, soit une vitesse moyenne de 107.000 km à l'heure !

Pour déterminer les positions astronomiques, il faut naturellement disposer d'instruments adéquats. L'ascension droite et la déclinaison sont mesurées à l'aide du *cercle méridien* qui se compose d'une lunette astronomique, munie d'un réticule, et mobile autour d'un axe horizontal. Elle ne peut se mouvoir que dans le plan méridien. Un cercle gradué,

que la lunette entraîne avec elle dans sa rotation dans le plan méridien, est fixé sur l'axe horizontal. On utilise le cercle méridien pour mesurer la hauteur et l'instant de passage d'un astre lorsqu'il traverse le plan méridien. Il permet également de mesurer la distance zénithale, à partir de laquelle, connaissant la latitude locale, on déduit l'autre coordonnée de l'étoile, la déclinaison (équivalente de la latitude terrestre projetée sur la sphère céleste). Une *lunette équatoriale* permet de suivre un astre lors de son parcours dans la voûte céleste. Il faut donc que la direction pointée par l'instrument reste fixe par rapport aux étoiles. Le dispositif comporte un premier axe de rotation qui pointe vers le pôle et la rotation de la Terre est compensée par celle de l'instrument dans le sens contraire et à la même vitesse. Un second axe, perpendiculaire au premier, permet de changer la direction visée. Ainsi, la rotation de la lunette autour du premier axe permet de suivre l'ascension droite de l'astre (équivalente, sur la sphère céleste, à la longitude terrestre) tandis que la rotation autour de l'autre axe fournit la déclinaison.

Enfin, précisons que toutes les mesures astronomiques sont limitées et perturbées par la réfraction atmosphérique. Celle-ci varie avec la pression atmosphérique, la température et la densité de l'air, qui sont elles-mêmes des fonctions de l'altitude, et elle diffère suivant la couleur de la lumière. Il faut aussi tenir compte de la dispersion, de l'extinction et de la diffusion de la lumière ainsi que du coefficient d'absorption de l'air. Ces propriétés optiques de l'air dépendent enfin de sa composition qui peut varier d'une observation à l'autre. La présence de vapeur d'eau et de poussières modifie de façon significative l'absorption, mais influe par contre peu sur la réfraction. On comprend que de nombreux physiciens aient dû se pencher sur ces questions, où la nature ondulatoire de la lumière, définitivement établie par Augustin Jean Fresnel (Broglie, 10 mai 1788 - Ville-d'Avray, 14 juillet 1827), joue un rôle primordial, pour les interpréter et les résoudre.

Mais ce n'est pas tout ! Le système solaire est situé dans la *Voie lactée*, une galaxie en spirale d'un diamètre d'environ 100.000 années-lumière (une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an. Comme celle-ci se propage à la vitesse de 299.792.458 m/s, une année-lumière équivaut à 9.460 milliards de km). Le système solaire fait le tour de la Galaxie en 250 millions d'années-lumière. En même temps, il oscille de part et d'autre du plan galactique avec une période de 66 millions d'années-lumière. De plus, l'univers est dans une phase d'expansion et les galaxies s'éloignent les unes des autres.



QVOD AQVA SIT ROTVNDA.

Quòd autẽ aqua habeant tumorem, & accedat ad rotunditatem, ſic patet. Ponatur ſignum in littore maris, et exeat nauis à portu, & in tantum elongetur, ꝙ oculus exiſtens iuxta pedem mali non poſſit uidere ſignum: ſtante uero naui, oculus eiuſdem exiſtentis in ſummitate mali bene uidebit ſignum illud, ſed oculus exiſtentis iuxta pedem mali melius deberet uidere ſignum, quàm qui eſt in ſummitate mali. ſicut patet per lineas ductas ab utroq; ad ſignum, & nulla alia huius rei cauſa eſt, quam tumor aquæ. Excludantur enim omnia alia impedimenta, ſicut nebulæ, & uapores aſcendentes. Item cum aqua ſit corpus homogeneum, totum cum partibus eiuſdem erit rationis, ſed partes aquæ: ſicut in guttulis, & roribus herbarum accidit: rotundam naturaliter appetunt formam, ergo & totum cuius ſunt partes.



B iij

Page du *Tractatus de Sphaera Mundi* de Sacrobosco

Il n'est pas question de retracer ici l'histoire de l'astronomie mais signalons que le plus ancien traité sur ce sujet publié en Europe qui nous soit parvenu est le *Tractatus de Sphaera Mundi* du moine anglais Johannes de Sacrobosco (ca. 1195 - ca. 1256). Il fut composé vers 1220 et publié seulement en 1472 simultanément à Venise par Florentius de Argentina et à Ferrare par Andreas Belfortis Gallus ou Gallicus. Sacrobosco séjourna à Paris et fut admis à la Sorbonne en 1221. Il y enseigna l'astronomie et les mathématiques. Une page de son livre est reproduite plus page précédente.

On comprend facilement la difficulté conceptuelle des générations précédentes (et même de la nôtre) à s'imaginer comment se combinent ces différents mouvements pour conduire aux phénomènes que nous observons et à les mettre en place dans une théorie cohérente permettant d'en rendre compte correctement. Il faut séparer l'apparence de la réalité, il faut trouver la bonne interprétation, le bon modèle parmi tous ceux qui s'offrent à l'esprit, celui qui conduit à interpréter au mieux les observations puis à effectuer des prédictions que l'on peut ensuite vérifier. Cette compréhension n'est venue que peu à peu au cours des siècles, par touches successives, à la suite des efforts de nombreux savants. Mais c'est ainsi que se bâtit toute théorie physique.

(voir Biblio : Messineo).

Un site à recommander est :
http ://media4.obspm.fr/public/amc/index.html

Voir aussi :
http ://fr.wikipedia.org/wiki/Portail :Astronomie
http ://www.astronomes.com/index.html

Pour un glossaire des termes d'astronomie, voir :
http ://astrosurf.com/astro_virtu/glossair/glossair.htm

La géodésie

La géodésie est l'étude de la forme et des dimensions de notre planète. Son problème essentiel consiste donc à définir, par des nombres (angles et distances), les positions relatives de points de repère. Ces points géodésiques sont matérialisés par des mires installées sur les sommets et les clochers, ou par de simples bornes. Du point de vue mathématique, le problème est complètement résolu si l'on dispose d'assez de mesures d'angles et de longueurs pour déterminer les triangles formés par les points et les dièdres (un dièdre est formé par deux demi-plans ayant une arête commune, comme une feuille de papier pliée en deux.) qui permettent de fixer les altitudes relatives des différents plans. Mais il est nécessaire de rapporter ces mesures à un système de trois axes. Il faut substituer à la surface physique réelle de la Terre, avec ses montagnes et toutes ses variations de terrain, une surface théorique facile à définir géométriquement au moyen de quelques paramètres et, surtout, facile à déterminer expérimentalement en chaque endroit où cela est nécessaire. Il ne peut s'agir d'une sphère puisque la Terre n'en est pas une parfaite. Signalons le peu d'importance du relief terrestre ; en effet l'Everest ne représente que la mille quatre cent-quarantième partie du diamètre de la Terre.

C'est là qu'intervient la notion de *verticale* qui est facile à définir partout grâce à un fil à plomb. Le point où cette verticale rencontre la sphère céleste s'appelle le *zénith*. Le plan qui lui est perpendiculaire permet de définir l'horizontale et il est donné par la surface d'un liquide au repos. Nous avons déjà vu ces notions dans le chapitre précédent. La verticale en un point est la seule donnée géométrique qui soit absolue, c'est-à-dire indépendante des points voisins. La surface terrestre théorique devra donc être perpendiculaire, en tout point, à la verticale. Mais il y a une infinité de telles surfaces de niveau, parallèles entre elles. On choisira celle qui vient se raccorder, le long du littoral, à la surface

de la mer. Un nouveau problème se pose alors : le niveau de la mer change et il faut donc déterminer son niveau moyen qui servira de zéro. Cette détermination s'effectue grâce à un appareil appelé *marégraphe*. Cependant rien ne nous dit que les zéros de tous les marégraphes, obtenus en divers points de la Terre, appartiennent rigoureusement à la même surface de niveau. Par conséquent, il faut choisir un point origine, sur la côte ou non, et prendre comme surface de comparaison la surface de niveau définie de proche en proche par l'ensemble des verticales et qui passe par cette origine. Cette surface de niveau, qui se rapproche le plus possible de la surface des mers, s'appelle le *géoïde*. C'est également la surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre en rotation. On démontre en effet, grâce à une formule due au physicien et mathématicien britannique George Gabriel Stokes (Skreen, Irlande, 13 août 1819 - Cambridge, 1er février 1903), que la forme d'une surface équipotentielle, à l'intérieur de laquelle se trouvent toutes les masses attirantes, est déterminée si l'on connaît la pesanteur en chacun de ses points.

Le géoïde a été introduit en 1873 par le mathématicien allemand Johann Benedict Listing (Francfort, 25 juillet 1808 - Göttingen, 24 décembre 1882). Mais cette surface empirique est irrégulière et peu accessible au calcul. La Terre est un solide de révolution un peu aplati aux pôles. On substitue donc au vrai géoïde une approximation donnée par un ellipsoïde de révolution, facile à définir mathématiquement à l'aide de deux paramètres (le grand et le petit axe), mais dont les écarts verticaux par rapport au géoïde peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres dans un sens comme dans l'autre. La principale conséquence de ces différences est d'introduire un écart entre la normale (la demi-droite perpendiculaire) en un point de l'ellipsoïde et la normale au même point du géoïde (la verticale donnée par le fil à plomb). Cet angle s'appelle la *déviation de la verticale*. Cette déviation est faible, mais peut cependant atteindre des valeurs non négligeables dans les zones montagneuses et surtout dans les zones volcaniques. Ainsi, au Piton de la Fournaise, sur l'île de la Réunion, cette déviation est de 100 secondes (de degré) ce qui induit une différence de 3 km sur une île d'une circonférence de 207 km, 72 km de long et 51 km de large. Les observations faites par rapport à la verticale doivent donc être corrigées de cette déviation pour être ramenées à la normale à l'ellipsoïde. Naturellement, si la Terre était un ellipsoïde de révolution parfait, la déviation de la verticale serait nulle en tout point du globe. Dès le XVIIIe siècle, on avait soupçonné que la

Terre n'était pas un ellipsoïde parfait. C'est Pierre Bouguer (Le Croisic, 16 février 1698 - Paris, 15 août 1758), mathématicien et hydrographe, qui, le premier, mesura cette déviation lors de l'expédition du Pérou. Selon la théorie émise par Isaac Newton (Woolsthorpe, Lincolnshire, 4 janvier 1642 - Londres, 31 mars 1727), cet écart pouvait atteindre 1'43" d'angle. Mais les mesures de distance zénithale de plusieurs étoiles ne fournirent qu'une valeur de 7,5". Bouguer émit alors l'hypothèse que cette différence était due à la présence du Chimborazo, un volcan qui s'élève à plus de 6.000 mètres. Cependant la valeur expérimentale s'écartait de la valeur théorique calculée en fonction de la masse de la montagne. Bouguer l'expliqua par la présence de cavités ou de variations de masse, préfigurant ainsi les études d'isostasie. Les mesures effectuées au cours des années suivantes montrèrent effectivement que l'attraction des montagnes était non négligeable. Nous en reparlerons plus loin.

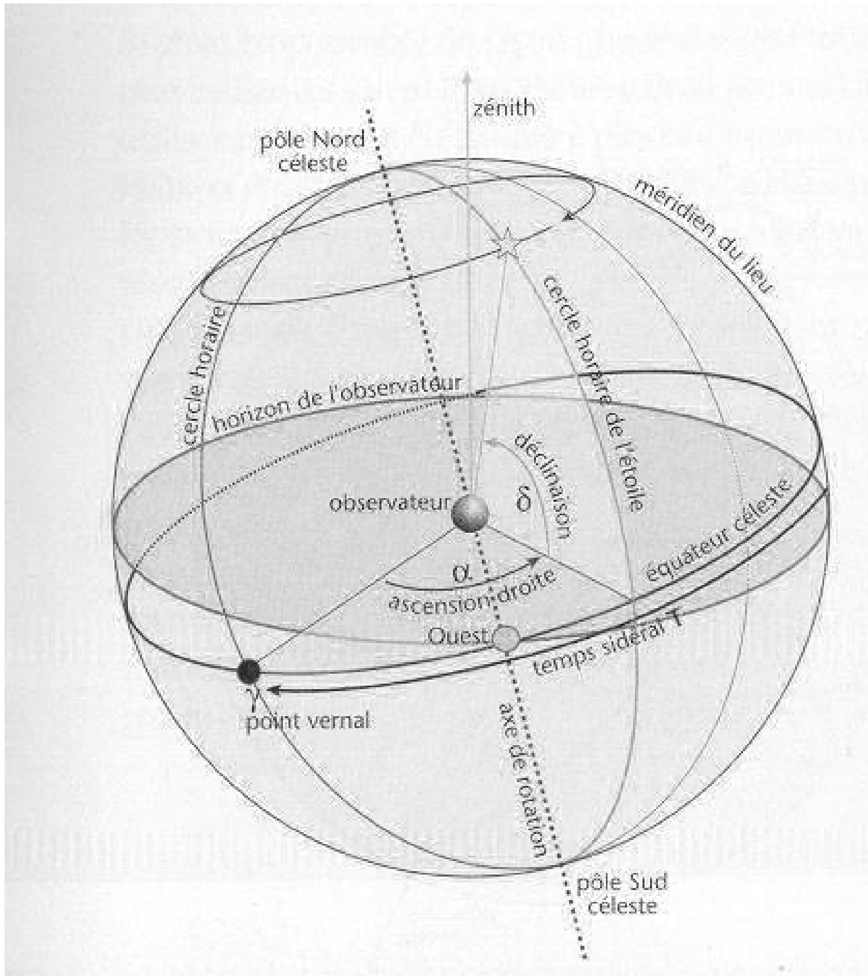
Le problème fondamental de la géodésie consiste à déterminer le plus précisément possible les positions respectives du géoïde et de l'ellipsoïde qui le représente. On le considére comme résolu si, en tout point de la Terre, on peut situer la direction et la normale à l'ellipsoïde par rapport à la verticale. Il faut, pour cela, avoir déterminé non seulement la forme et les dimensions de l'ellipsoïde terrestre, mais également sa position dans l'espace afin que ses normales coïncident le mieux possible avec l'ensemble des verticales. Ce n'est qu'alors que la distance entre deux lieux qui ne sont pas reliés par une triangulation et dont on ne connaît que les coordonnées astronomiques (Paris et New York, par exemple) pourra être calculée avec précision.

La relation étroite entre géodésie et cosmographie et l'existence d'un axe de rotation (presque) stable pour la Terre ont conduit à l'adoption d'un système de coordonnées géographiques. Nous allons donc donner de nouveau, selon ce point de vue, certaines des définitions vues précédemment. La *colatitude* d'un point est l'angle de la verticale avec la droite parallèle à l'axe de la Terre. Un *parallèle* est le lieu géométrique des points ayant même colatitude (un lieu géométrique désigne l'ensemble des points du plan ou de l'espace vérifiant une certaine propriété). Le parallèle au-dessus duquel le Soleil, la Lune et les planètes passent presque à la verticale s'appelle l'*équateur*. C'est le parallèle qui sert d'origine. Les parallèles sont donc des cercles de plus en plus petits qui ceinturent le globe de l'équateur aux pôles. Un plan *méridien* est un plan formé par la verticale, donnée par le fil à plomb, et la droite parallèle à l'axe de

rotation de la Terre. Les méridiens sont des grands cercles de la Terre passant pas les pôles. Comment savoir si deux points sont situés sur le même méridien ? La réponse à cette question majeure est simple : l'ombre. La longueur de l'ombre d'un bâton, le *gnomon*, planté verticalement dans le sol change avec l'heure. L'ombre la plus courte s'appelle l'*ombre méridienne* car elle se produit quand le Soleil passe au méridien du lieu. Sa hauteur au-dessus de l'horizon est alors la plus grande possible ; c'est le midi vrai. Dans l'hémisphère Nord, sauf dans la zone intertropicale à certains moments de l'année, une telle ombre est orientée du nord (sommet du piquet) au sud (pied du piquet). Si deux points sont sur le même méridien alors leurs ombres méridiennes sont alignées ; elles suivent le méridien. La différence de longueur des ombres méridiennes de deux bâtons identiques situés sur le même méridien permet de connaître l'angle de l'arc qui les intercepte. En ajoutant un socle au gnomon, on obtient un cadran solaire rudimentaire. La *longitude* est l'angle d'un plan méridien choisi comme origine et du plan méridien du point considéré. Il existe une longitude astronomique, définie sur le géoïde, qui diffère de la longitude géodésique, définie sur l'ellipsoïde. La *latitude* d'un lieu est l'angle entre ce point et le point de l'équateur situé sur le même méridien. C'est l'angle complémentaire de la colatitude.

Le parallèle de latitude zéro est donc l'équateur et sa position est fixée par les lois de la nature. Au contraire, le méridien de longitude zéro peut être fixé arbitrairement. Dans l'antiquité, au temps de Marin de Tyr (né à la fin du Ier siècle et mort au début du IIe) et de Ptolémée, on utilise celui qui passe à un degré environ à l'ouest des îles des Fortunés (sans doute celles du Cap-Vert). Au Moyen Âge, les arabes le fixent aux Colonnes d'Hercule (Gibraltar) ou à Azin, à 10 degrés à l'est de Bagdad. Puis, ce sont les Açores, les Canaries ou le Cap-Vert. Un congrès de mathématiciens et d'astronomes, réuni à Paris en juillet 1630, le place à El Hierro, la plus petite et la plus occidentale des îles Canaries, car c'est la plus à l'ouest de toutes les terres européennes. Dans des atlas des XVIIe et XVIIIe siècle, l'origine des méridiens est le Pic du Teide à Ténérife. En France, c'est longtemps le méridien passant par Paris. Puis on le retrouve à 20 degrés à l'ouest de la capitale. En 1850, le Congrès américain décide que l'observatoire de Washington servirait de méridien zéro pour les États-Unis. En 1880, on ne compte pas moins de quatorze méridiens d'origine, chaque pays voulant avoir le sien ! Mais une conférence internationale choisit finalement celui de Greenwich en 1884 car la Grande-Bretagne est alors la nation possédant le plus vaste empire

au monde et le commerce le plus actif. Paris renonce à son méridien au début de 1911 et les Américains au leur un an plus tard.



La sphère céleste

Les débuts de la géodésie

Les anciens croyaient que la Terre était plate. Mais, était-ce un disque ou un carré ? Les deux points de vue pouvaient être admis et l'ont été selon les cultures.

Signalons que toutes les mesures anciennes de longueur données ici dans notre système moderne peuvent être sujettes à caution puisqu'elles étaient obtenues avec des unités dont nous ne connaissons par forcément l'équivalence avec une grande exactitude.

Les Grecs

Les premières conceptions géodésiques sont naturellement liées à l'astronomie. Thalès de Milet (Milet, ca. 625 av. J.-C. - ca. 547 av. J.-C.) montre que les étoiles décrivent des cercles autour du pôle et il aurait, selon l'historien des sciences Paul Tannery (Mantes-la-Jolie, 20 décembre 1843 - Pantin, 27 novembre 1904), prédit l'éclipse totale du Soleil du 28 mai 585 av. J.-C. ou celle du 30 septembre 610 av. J.-C. Grâce à la géométrie, il calcule la hauteur des pyramides. Ce résultat peut s'obtenir en comparant leurs ombres avec celle d'un gnomon. On peut donc supposer qu'il avait effectivement découvert le fameux théorème qui porte son nom, selon lequel une droite parallèle à l'un des côtés d'un triangle y détermine un triangle semblable, et qu'il était capable d'en fournir une démonstration. Une autre possibilité dont Thalès s'est peut-être servi pour calculer cette hauteur est que, lorsque les rayons du soleil sont inclinés à 45° (ce qui ne se produit à Gizeh que le 21 novembre et le 20 janvier), la longueur de l'ombre d'un objet est égale à sa hauteur. Du haut d'une tour, il mesure également la distance au rivage d'un navire qui disparaît à l'horizon. Si l'on connaît l'angle entre la direction du navire et l'horizontale (angle appelé *dépression de l'horizon*), alors des formules simples de trigonométrie permettent de calculer le rayon terrestre. Mais Thalès n'avait sans doute pas ces formules à sa portée et, de plus, une petite erreur sur l'angle ou sur la hauteur de la tour entraîne une erreur importante dans la détermination du rayon. Pour son école, l'Univers est une bulle d'air entourée d'eau et la Terre est une sorte de galette au fond de cette bulle.

Pour les disciples de Pythagore (ca. 570 av. J.-C. - 480 av. J.-C.), les corps célestes sont sphériques parce que la sphère est la figure la plus parfaite qui puisse se concevoir dans l'espace. L'historien et géographe ionien Hécatée de Milet (ca. 550 av. J.-C. - ca. 480 av. J.-C.) prétendait que la Terre était ronde. Il aurait même dessiné l'une de ses toutes premières cartes, la représentant circulaire, la Méditerranée au centre de terres complètement entourées d'un fleuve qu'il nommait « Océan ». Philolaos, un élève de Pythagore, né à Crotone, ou à Tarente ou à He-

raclée vers 474 av. J.-C., affirmait que la Terre n'était pas au centre de l'Univers, mais qu'elle tournait en un jour autour d'un « feu central », demeure de Zeus, différent du Soleil et placé au centre de l'Univers. Il appela ce centre « Estia », d'après la déesse grecque du feu et du foyer Hestia. Cette idée fut l'une des premières à expliquer avec une certaine logique le mouvement apparent des étoiles autour de la Terre. Le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles tournaient également autour de ce feu central. Mais, comme la Terre tournait sur elle-même en vingt-quatre heures, le feu central lui restait toujours invisible. Une autre planète, l'Anti-Terre, tournait également autour de ce centre, mais comme elle en était plus rapprochée, elle demeurait invisible au monde méditerranéen. Ces deux astres n'avaient en fait pour seule raison d'être que de porter à dix le nombre des astres, un nombre important pour les Pythagoriciens. Héraclide le Pontique (Héraclée, ca. 388 av. J.-C. - ca. 310 av. J.-C.) est un disciple de Platon, mais on peut le considérer comme un aristotélicien. Il défend la thèse d'un système géocentrique où Vénus et Mercure tournent autour du Soleil et où la Terre tourne sur elle-même, autour de son axe. Cette hypothèse lui permet d'expliquer le mouvement apparent des étoiles au cours de la nuit. Nicolas Copernic (Toruń, 19 février 1473 - Frombork, 24 mai 1543) le revendiquera comme son précurseur.

Les Grecs disposaient de trois instruments de mesure, en bois : le quadrant statique, le triquetrum et la sphère armillaire. Le premier est un quart de cercle muni d'un système de visée afin de déterminer la hauteur du Soleil dans le plan méridien. Le triquetrum est un assemblage de trois règles dont l'une porte des pinnules. Il sert aussi à mesurer des hauteurs. La sphère armillaire, également appelée astrolabe sphérique, possède un système de visée et de cercles gradués (voir Biblio : L. Maison). Ce sont les Grecs qui, les premiers, tiennent des raisonnements scientifiques en faveur de la rotondité de la Terre. En effet, Anaxagore de Clazomènes (500 av. J.-C. - 428 av. J.-C.) remarque l'ombre circulaire faite par la Terre lors des éclipses de la Lune. Parménide (fin du VIe siècle - milieu du Ve siècle av. J.-C.) affirme, le premier d'après Théophraste (Érésos, ca. 372 av. J.-C. - Athènes, ca. 288 av. J.-C.), que la Terre est ronde. Citons un passage du *Traité du ciel* d'Aristote (Stagire, 384 av. J.-C. - Chalcis, 322 av. J.-C.), Livre II, Chapitre XIV (voir : http //remacle.org/bloodwolf/philosophes/Aristote/tableciel.htm),

> *Quant à sa forme, il faut nécessairement qu'elle soit sphérique ; car chacune de ses parties ont de la pesanteur jusqu'au*

> *centre ; et la partie la plus faible étant poussée par la plus forte, elle ne peut se soulever irrégulièrement comme les flots de la mer...*
>
> *On peut encore démontrer la sphéricité de la terre par les phénomènes qui frappent nos sens. Ainsi, si l'on supposait que la terre n'est pas sphérique, les éclipses de lune ne présenteraient par les sections qu'elles présentent, dans l'état actuel des choses...*
>
> *Et les mathématiciens qui ont essayé de mesurer les dimensions de la circonférence, la portent à quarante fois dix mille stades. C'est d'après ces preuves péremptoires qu'on est nécessairement amené à penser que non seulement la masse de la terre est de forme sphérique, mais encore que cette masse n'est pas fort grande comparativement à celle des autres astres.*

Si l'on estime que le stade fait un peu moins de 200 m, on obtient environ 80.000 km pour la circonférence terrestre. En supposant que le stade vaille 157.5 m (valeur admise pour les calculs d'Ératosthène), on trouve 63.000 km.

Puis c'est Strabon (Amasée, Capadoce, ca. 57 av. J.-C. - 21-25 ap. J.-C.) qui s'aperçoit que les navires disparaissent à l'horizon, ce qui renforce la conception de la sphéricité terrestre. Enfin, quand on marche en direction du nord, on voit l'étoile Polaire de plus en plus haut dans le ciel et le Soleil de plus en plus bas à midi, phénomènes qui ne pourraient avoir lieu si la Terre était plate. Eudoxe de Cnide (Cnide, ca. 406 av. J.-C. - ca. 355 av. J.-C.) pense que la Terre est une sphère au centre d'une autre sphère plus grande. Pour les Ioniens, la géographie est inséparable de la géométrie. (voir Biblio : Baccou, Serres).

La première véritable mesure (peut-être devrait-on dire estimation ?) de la circonférence d'un méridien terrestre est due à Ératosthène de Cyrène (Cyrène, Lybie, ca. 284 - Alexandrie, ca. 192 av. J.-C.). C'était un mathématicien et astronome qui vivait à Alexandrie, dont il dirigeait la fameuse bibliothèque. Son ouvrage *Sur la mensuration de la Terre* a été perdu, mais on connaît sa méthode par la description simplifiée qu'en a donné Clèomède dans son œuvre *Coelestia* au IIe siècle avant J.-C.

Le Nil coule du sud au nord et il est entièrement situé en Égypte. C'est un méridien idéal et Alexandrie n'en est pas très éloignée. Ainsi

que l'atteste l'architecte romain Marcus Vitruvius Pollio (Vitruve) au premier siècle av. J.-C., Érathosthène savait qu'à midi, au solstice d'été, le soleil frappait le fond des puits à Syène (aujourd'hui Assouan), proche du tropique du Cancer (Pline raconte, qu'en fait, le puits n'avait été creusé qu'après coup, comme vérification). Les deux villes étant situées (presque) sur le même méridien, le Soleil s'y trouve au zénith simultanément. Grâce à un bâton planté verticalement dans le sol, le gnomon, Ératosthène mesura, à Alexandrie, la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon ce même jour et trouva $82°48'$. Pour pouvoir appliquer les résultats de géométrie d'Euclide, Ératosthène assimila les rayons du Soleil à des droites et supposa celui-ci situé à l'infini. Les rayons provenant du Soleil étaient donc tous parallèles. Avec ces deux hypothèses, il put alors appliquer le théorème, attribué à Thalès par Proclus dans son commentaire du premier livre d'Euclide, selon lequel *les droites qui tombent sur des parallèles produisent des angles alternes égaux*. C'est ainsi que, dès le IVe siècle avant J.-C., les Grecs calculaient les latitudes en mesurant la longueur au sol de l'ombre d'un gnomon à midi au solstice d'été. La différence de latitude entre Syène et Alexandrie était donc de $7°12'$, c'est-à-dire la cinquantième partie d'une circonférence. Ayant interrogé de nombreux chameliers, Ératosthène estima que la distance entre Syène et Alexandrie était de 5.000 stades. Multipliant cette valeur par 50, il obtint 250.000 stades pour la circonférence de la Terre, plus précisément il utilisa 252.000. Le nombre 2.520 est en effet divisible par tous les nombres entiers entre 1 et 10, propriété qui simplifie grandement de nombreux calculs. On est donc en droit de se demander si le hasard seul l'a conduit à cette valeur. On a estimé que le stade dont il se servait valait 157,5 m, ce qui fournit donc une valeur de 39.375 km, soit une erreur de 0.8%. Si l'on prend 185 m pour le stade, l'erreur est de 17%. Signalons cependant que la longueur d'un stade diffère selon les commentateurs et que la différence de longitude entre Syène et Alexandrie, qui est d'environ trois degrés (soit 285 km) implique une erreur de 7%.

Cléomède, qui vivait au Ier siècle avant J.-C. et écrivit un traité d'astronomie, rapporte que le gnomon ne donne aucune ombre à midi au solstice d'été dans une bande de 300 stades autour du tropique. Cela tendrait à prouver qu'Ératosthène se livra à de nombreuses mesures. Cependant, selon l'opinion admise, les Grecs ne savaient pas alors calculer la moyenne arithmétique de plusieurs quantités. Il est, par conséquent, évident que l'excellente valeur obtenue par Ératosthène est due à la compensation fortuite et bienvenue des diverses erreurs. Cependant sa

mesure de la circonférence terrestre est une brillante illustration de la conduite d'une méthode scientifique, oscillant entre modèle théorique et expérimentation (voir Biblio : Russo et Soso).

Cent ans plus tard, Posidonius d'Apamée (135 av. J.-C. - 50 av. J.-C.) refit la mesure sur l'arc entre Rhodes et Alexandrie et trouva 11.100 km. Il avait obtenu cette valeur en observant l'étoile Canopus depuis ces deux lieux. Ses estimations de distance et d'angle étaient fausses mais les erreurs s'étaient compensées ! D'autres mesures, souvent moins exactes et sous-estimées, suivront au cours des siècles. Au premier siècle de notre ère, Héron d'Alexandrie publie *La dioptre*, ouvrage qui peut être considéré comme le premier traité d'arpentage. Il décrit l'utilisation de l'alidade, de la règle et du cordeau et donne des méthodes pour déterminer les distances entre des points même s'ils sont inaccessibles. Ses travaux seront abondamment repris par Marinus de Tyr, né vers la fin du Ier siècle et décédé au début du IIe siècle, à partir d'un canevas inspiré de celui d'Hipparque de Nicée. Il choisit comme méridien d'origine celui des Canaries et traça un réseau de méridiens et de parallèles équidistants formant des rectangles. La projection était correcte au niveau du 36e parallèle, qui est celui de l'île de Rhodes. Ce type de carte, très pratique, fut adopté par les marins et annonçait la projection de Mercator. Cependant, ayant pris la valeur trop petite de Posidonius (au lieu de celle, bien meilleure, d'Ératosthène) pour la longueur de la circonférence terrestre, il estima à 225° la différence de latitude entre l'Espagne et la Chine au lieu des 130° réels. Ainsi le Globe avait une circonférence de 30.000 km environ, valeur sur laquelle s'appuiera, en partie, Christophe Colomb.

Ce fut Claude Ptolémée (Ptolémaïs de Thébaide, ca. 100 - Canope, ca. 170) qui montra, dans son *Almageste*, comment déterminer la latitude à partir de la longueur du jour le plus long (au solstice d'été), du moins pour les lieux situés au nord du tropique du Cancer. Pour la zone tropicale, il déterminait l'heure à laquelle le Soleil passait au zénith en fonction de la latitude. Malgré la médiocrité des instruments de mesure du temps de l'époque, il atteignit une précision de 2 ou 3 degrés, bien suffisante alors. Mais, en fait, le problème n'est pas aussi simple que cela car le mouvement du Soleil n'est pas uniforme. Il est plus rapide en hiver car l'orbite terrestre n'est pas un cercle mais une ellipse et la distance Terre-Soleil est actuellement minimale vers le 2 janvier et maximale vers le 6 juillet. Mais ces dates elles-mêmes avancent au cours des siècles ; elles dépendent d'un phénomène découvert par Hipparque. L'axe

de rotation de la Terre est en effet incliné de $23°26'$ par rapport au plan de l'écliptique (sa trajectoire autour du Soleil). Comme c'est le cas pour une toupie, cet axe tourne lui-même lentement (en 26.000 ans) autour de la perpendiculaire au plan de l'écliptique en gardant pratiquement tout le temps cette même inclinaison. C'est le phénomène de précession des équinoxes dont il a déjà été question. Ce phénomène est lui-même perturbé par la présence de la Lune qui induit une légère oscillation de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, la *nutation*, découverte par l'astronome anglais James Bradley (Sherbourne, mars 1692 - Chalford, 13 juillet 1762) en 1728, mais dont il ne donnera l'explication que vingt ans plus tard. Ce n'est pas le véritable pôle de la Terre qui décrit cette circonférence, mais sa position moyenne. Le vrai pôle oscille en décrivant une courbe autour du pôle moyen avec une période de dix-huit ans deux tiers. Bradley avait attendu un cycle complet du phénomène afin de pouvoir vérifier sa découverte et l'annoncer. D'Alembert démontrera, un an et demi plus tard, que cette courbe est une ellipse.

On peut penser à mesurer la latitude à l'aide de la hauteur de l'étoile Polaire, qui indique l'axe du monde. Mais, à cause de la précession des équinoxes, cette étoile n'est pas toujours celle qui se trouve la plus proche du pôle Nord céleste. Ce n'est que vers 1400 qu'elle le devint. Ainsi, les Égyptiens orientèrent-ils leurs monuments en fonction d'une autre étoile alors que, quelques siècles plus tard, plus aucune étoile n'était proche du pôle. On peut remédier à cela en faisant la moyenne entre la position la plus basse et la position la plus haute d'une étoile circumpolaire. Mais qui dit deux mesures dit deux fois plus d'erreurs. C'est ainsi que l'on a longtemps cru que Byzance et Marseille étaient à la même latitude alors qu'il y a deux degrés d'écart, soit 220 km. Enfin, est-il possible, surtout lorsque l'on est en mer, d'attendre pour connaître sa position ? On dressa donc des catalogues d'étoiles. Si l'on connaît leurs écarts au pôle, l'une d'elles sera peut-être en son point le plus haut ou le plus bas et, par simple addition ou soustraction, on calculera sa latitude. Mais encore faudra-t-il tenir compte de la réfraction atmosphérique, de l'*aberration de la lumière* (à cause de la vitesse finie de propagation de la lumière, la position exacte d'un astre diffère de sa position observée au même instant. Lorsque, à partir d'un train, on observe de la pluie qui tombe verticalement, on la voit tomber en biais) et de l'erreur de parallaxe ! On commence à saisir les difficultés du problème. La *parallaxe* est due au fait que la Terre et les astres ne sont pas des points immatériels mais des solides ayant une certaine dimension. C'est l'angle sous lequel, depuis

un astre, on voit une longueur de référence ; pour les astres du système solaire, il s'agit du rayon de la Terre et l'on parle de parallaxe diurne, alors que, pour les astres extérieurs au système solaire, la référence est le demi-grand axe de l'orbite terrestre, c'est la parallaxe annuelle.

Mais revenons à Ptolémée ; il prit la valeur de 500 stades (au lieu des 700 d'Ératostène) comme longueur d'un degré de méridien, ce qui correspond à 30.000 km pour la circonférence terrestre. Il faut dire à sa décharge que des siècles séparaient les deux savants et que les travaux sur ce sujet avaient été interrompus par les persécutions d'Evergète II en 145 avant J.-C. Ptolémée, tout en connaissant la méthode d'Ératosthène, ne put jamais refaire les calculs, mais réinterpréta, en se trompant, les données de ses prédécesseurs (voir Biblio : Soso).

Les Grecs avaient donc établi la sphéricité de la Terre, ils en avaient évalué la dimension, ils étaient capables de repérer des positions à sa surface et savaient déterminer la longitude par l'observation des éclipses. L'astronomie les avait également conduits à distinguer les pôles, qui sont déterminés par l'axe de révolution de la Terre, l'équateur, les tropiques, qui marquent le dernier point où le Soleil s'élève au zénith pendant l'été, et les cercles polaires. Ces conceptions étaient inséparables de l'hypothèse géocentrique qui place la Terre au centre de l'Univers. La réalité de la sphéricité du globe terrestre sera définitivement prouvée au retour du voyage de Fernão de Magalhães, dit Magellan (Région de Trás-os-Montes ?, Portugal, ca. 1480 -Île de Mactan, Philippines, 27 avril 1521) en 1522.

Le déclin des connaissances géographiques commence en Europe avant la chute de l'Empire romain en 476. Le bouillonnement intellectuel disparaît. L'hypothèse géocentrique et l'idée de la sphéricité de la Terre qui l'accompagne sont même rejetées par la majorité de la classe cultivée privée de l'accès au grec, langue scientifique par excellence. Certains savoirs antiques se heurtent au christianisme. Le mythe biblique de la Terre plate refait surface chez saint Augustin (Thagaste, Algérie, 13 novembre 354 - Hippone, 28 août 430) et les géographes Constantin d'Antioche, dit Cosmas Indicopleustes (VIe siècle), et Isidore de Séville (Carthagène, ca. 560 - 4 avril 636) s'y rallient. La Terre est un disque dont le centre est Jérusalem et la périphérie la *Mare oceanum.*

Les Arabes

En expansion depuis Mahomet (570 - 632), les Arabes furent les intermédiaires entre la science grecque et l'Occident, comme ils le furent également entre l'Asie et l'Europe. Ils initièrent une longue tradition géographique qui s'épanouit vraiment de 800 à 1050. L'usage de l'arabe est alors général, même chez les auteurs issus de Perse ou d'Asie centrale. On possède ainsi une édition de la traduction en latin d'une traduction arabe de Ptolémée annotée de la main même de Copernic. L'*Almageste*, dont le nom provient de l'arabe, sera traduit dans cette langue au début du IXe siècle.

La première publication arabe à caractère géographique date de 846 ; il s'agit du *Livre des routes et des voyages* de Ibn Khurdâdhbeh (820 - 911), un lettré, fils d'un gouverneur, qui dirigeait le service de la poste à Bagdad, dans lequel des itinéraires sont donnés avec les distances correspondantes.

En 827, le Khalife Al-Mamoun (Bagdad, 13 septembre 786 - Tarse, 10 août 833) fit reprendre la mesure du méridien sur un arc de 2°. Elle s'effectua dans la plaine du Sinjar près de Bagdad et fut conduite par le célèbre mathématicien arabe Al-Khwarizmi né à Khiva dans la région du Khwarezm (Ouzbékistan), d'où son nom, vers 780 et mort à Bagdad vers 850. Il fut l'inventeur de l'algèbre et son nom donnera le mot *algorithme* (on utilise ce mot pour désigner un ensemble de règles successives qui permettent de résoudre concrètement un problème mathématique. Des exemples en sont ceux pour l'extraction de la racine carrée d'un nombre, pour la division ou la règle de trois). C'est lui également qui fit connaître les chiffres indiens à l'Occident. Les savants arabes utilisèrent des perches et obtinrent 11.016 km. Ils développèrent également leur propre astronomie, d'abord à partir de sources indiennes et perses, puis mésopotamiennes. Dans son ouvrage *Zij al-Sindbind* (la table de Sindbind), Al-Khwarizmi exposa des calculs sur la position des planètes en suivant le modèle indien.

À partir de ces premiers travaux, le méridien d'origine fut souvent changé et les positions des principales villes musulmanes recalculées à l'aide de la trigonométrie que les Arabes avaient grandement contribué à enrichir. La cartographie terrestre se développe avec l'école d'Al-Balkhi, mort en 934, puis avec Al-Istakhri (vers 930-950) et Ibn Hawqal (actif entre 943 et 973). Ibn Yûnus (Égypte, ca. 950 - 1009) réalisa une mappemonde qui a été perdue. Mais bien d'autres noms seraient à mentionner.

À l'âge de 22 ans, le grand savant persan Abu Raihan Al-Birûni (Kath, Khwarezm, 15 septembre 973 - 13 décembre 1048) publia un ouvrage intitulé *La projection des figures et l'aplatissement des sphères* dans lequel il expose huit types de projections cartographiques, dont au moins deux sont nouvelles. La plus précise, dite globulaire, ne fut redécouverte en Europe que six siècles plus tard. Il estima également à 6.339,6 km le rayon terrestre, valeur qui sera longtemps utilisée. C'est grâce à ses grands voyageurs que la géographie arabe se développe comme on le voit à travers les œuvres de Al-Muqaddasi (ca. 945 - 1000) et d'Al-Idrîsî (Ceuta ?, 1100 - Sicile, ca. 1165) qui publie un recueil de ses voyages alors qu'il séjourne à Palerme à la cour du roi Roger II de Sicile (ca. 1095 - 1154).

À Tolède, vers le milieu du XIe siècle, Ali Ibn Khalaf mit au point une projection utilisant le point vernal comme pôle. Elle fut améliorée par Az-Zarqâli (Tolède, 1028 - 1087). Celui-ci inventa un astrolabe universel indépendant de la latitude. Il corrigea aussi l'estimation de Ptolémée sur la longueur de la Méditerranée de 62° à sa valeur pratiquement correcte de 42° et anticipa sur Kepler en suggérant que les orbites des planètes n'étaient pas circulaires mais un peu étirées. Ses écrits eurent une profonde influence sur les astronomes espagnols qui ont élaboré des tables des étoiles visibles à l'œil nu connues sous le nom de *Tables alphonsines* en référence au roi Alphonse X de Castille qui, 200 ans après la mort d'Al-Zarqâli, ordonna la traduction de toutes ses œuvres dans la langue locale de la Castille. Elles parurent en 1252 et furent imprimées à Venise en 1483. L'astronome Paolo Toscanelli (Florence, 1397 - Florence, 15 mai 1482) les corrigea d'après les mesures qu'il effectua à Florence avec le gnomon qu'il avait installé dans le dôme de Santa Maria del Fiore et qui, donnant une image nette du Soleil sur la ligne méridienne matérialisée par une bande de marbre dans le pavé de la place, lui servit également à déterminer les solstices et les variations de l'écliptique.

À partir du XIe siècle, des réseaux de coordonnées ou même des quadrillages apparaissent sur les cartes. Initialement, leur but était d'indiquer au fidèle la direction de la prière. De nombreux textes scientifiques arabes, dont l'*Almageste* de Ptolémée, les *Coniques* d'Apollonius de Perga (ca. 262 av. J.-C. - ca. 190 av. J.-C.), plusieurs traités d'Aristote, le *Canon* d'Avicenne ou Ibn Sînâ, (Afshéna, 7 août 980 - Hamadan, août 1037) et d'autres écrits majeurs, furent traduits en latin par Gérard de Crémone (Crémone, ca. 1114 - ca. 1187). Il vint à Tolède en 1167 pour apprendre l'arabe et s'instruire auprès des savants maures. C'est grâce

à lui que beaucoup d'ouvrages de l'Antiquité ont pu parvenir jusqu'à nous.

Nombre de nos connaissances nous viennent des Indiens. Cependant, il ne semble pas que, malgré leur niveau mathématique avancé, ils aient apporté des contributions significatives à la géodésie. Les bouddhistes et les jaïns postulaient une Terre plate. Mais leurs astronomes avaient reconnu, dès le début de l'ère chrétienne, que cette notion erronée ne prévalait que pour des motifs religieux et que notre planète était sphérique. Plusieurs estimations de sa dimension avait été données, dont la plus connue, celle de Brahmagupta (Multân, 598 - 668), directeur de l'observatoire astronomique d'Ujjain - le plus grand centre de mathématiques de l'époque - inventeur du zéro et des nombres négatifs, conduisait à une circonférence d'environ 36.000 km.

Signalons que l'astronomie indienne a donné lieu à l'ouvrage de l'astronome Jean Sylvain Bailly (Paris, 15 septembre 1736 - Paris, guillotiné le 12 novembre 1793), élu Maire de Paris le 15 juillet 1789, *Histoire de l'astronomie indienne et orientale* paru en 1787, ainsi qu'aux *Études sur l'astronomie indienne et sur l'astronomie chinoise* (1862) de Jean-Baptiste Biot (Paris, 21 avril 1774 - Paris, 3 février 1862), dont nous aurons largement l'occasion de reparler.

Les Européens

Au Moyen Âge, la science se désintéresse de ces questions jusqu'en 1525, date à laquelle le mathématicien, astronome et médecin d'Henri II, Jean Fernel (Montdidier, 1497 - Fontainebleau, 26 avril 1558) mesure l'arc entre les cathédrales de Paris et d'Amiens situées sur le même méridien. Il détermine d'abord la latitude de ces deux villes au moyen d'observations du Soleil et mesure la distance qui les sépare en comptant le nombre de tours de roue de sa voiture (l'odomètre, compteur qui s'adapte à une roue, ne sera inventé qu'en 1678 quoique sa conception soit beaucoup plus ancienne ; il ne sera utilisé qu'à titre expérimental). Il trouve 56.746 toises (10.011 km), un excellent résultat pour l'époque, cependant obtenu après des corrections assez arbitraires pour tenir compte des accidents de la route.

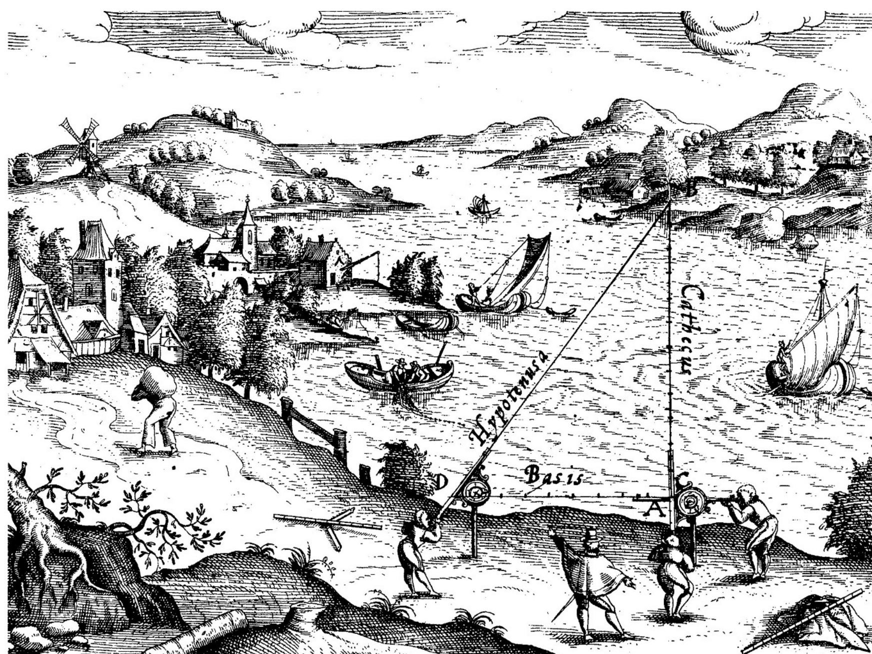
Caspar Peucer (Bautzen, 6 janvier 1525 - Dessau, 25 septembre 1602) enseigne les mathématiques, l'astronomie et la médecine à l'université de Wittenberg, puis il devient médecin du prince électeur Auguste de

Saxe. En 1550, il fait paraître, à l'usage de ses étudiants, *De dimensione terrae*, une brève synthèse des ouvrages antiques consacrés à la mesure de la sphère et à la détermination des coordonnées géographiques. Il y ajoute des commentaires sur la manière de calculer la distance entre deux lieux. Dans une nouvelle édition de 1554, il donne de nombreux détails sur la conversion des coordonnées géographiques (longitude, latitude et angle) en distances à l'aide des résultats les plus récents de la trigonométrie sphérique. L'originalité de sa démarche réside en une approche mathématique et géométrique de la réalisation des cartes. Il ne se contente pas de décrire, mais il veut montrer comment effectuer les calculs topographiques. Il cite les astronomes et mathématiciens Johannes Regiomontanus (Umfinden en Franconie, 6 juin 1436 - Rome, 6 juillet 1476) et Joachim Rheticus (Feldkirch, 15 février 1514 - Kassa, 4 décembre 1574), ainsi que Nicolas Copernic. Cet ouvrage est l'un des premiers, sinon le premier, traités de géographie mathématique.

En 1661, le jésuite Giovanni Battista Riccioli (Ferrare, 17 avril 1598 - Bologne, 25 juin 1671) mesure la distance zénithale de deux astres connus (angle entre la direction du zénith et celle de l'astre) et utilise le fait que la somme des angles d'un triangle vaut 180 degrés. Il obtient 62.900 toises pour le degré terrestre. Cette méthode, qui aurait été indiquée par Kepler, ne pouvait rien donner de précis car, encore actuellement, la mesure de distances zénithales est délicate à cause de la réfraction atmosphérique.

L'idée de la triangulation

Une idée résolument nouvelle fut celle de la triangulation. Elle consiste à remplacer la mesure directe de la longueur d'un arc de méridien par une mesure indirecte au moyen des angles d'une triangulation. Une triangulation est constituée d'une chaîne de triangles adjacents dont les sommets se situent alternativement de part et d'autre de l'arc AB du méridien à mesurer. Le premier triangle doit avoir le point A comme sommet et le dernier triangle se terminer en B. À partir de la mesure de la longueur de l'un des côtés du premier triangle et de celles des angles, on détermine, à l'aide des formules de trigonométrie, les côtés de tous les triangles. On abaisse ensuite les hauteurs de tous les triangles sur le segment AB et l'on peut ainsi calculer peu à peu la distance AB. La dernière étape consiste à orienter la chaîne de triangles par rapport au méridien.



La triangulation (gravure du 16e siècle)

L'avantage de la triangulation est, qu'au lieu d'avoir à mesurer avec précision une très grande distance, on ne doit plus mesurer qu'un seul côté d'un triangle beaucoup plus petit puis des angles, mesures sujettes à des erreurs bien moindres. Les formules trigonométriques font le reste.

Naturellement, puisque la Terre, n'est pas plate, il faut utiliser des formules de trigonométrie sphérique. Cependant, pour de petites distances, l'erreur est faible et, de plus, des formules dues à Adrien Marie Legendre (Paris, 18 août 1752 - Paris, 5 janvier 1833) permettent de corriger facilement ces pertes de précision. La somme des angles d'un triangle sphérique est supérieure à 180° ; c'est l'excès sphérique. D'après le raisonnement de Legendre, les calculs peuvent s'effectuer comme si le triangle était plan en retranchant de chaque angle le tiers de l'excès sphérique. Un autre résultat, dû celui-là au grand mathématicien et physicien allemand Carl Friedrich Gauss (Braunschweig, 23 avril 1777 - Göttingen, 22 février 1855), permet de calculer l'excès sphérique connaissant les dimensions approximatives du triangle. Ces formules permettent d'obtenir une précision élevée par des calculs relativement simples. Ce-

pendant, sur l'ellipsoïde, de sérieuses difficultés apparaissent pour calculer les positions des sommets successifs de la chaîne des triangles à partir de ses éléments.

Quand on a triangulé une région, encore faut-il la rattacher aux triangulations des régions voisines. Pour cela, l'un des points de la triangulation est choisi comme point fondamental. Par des mesures astronomiques, on en détermine la longitude, la latitude ainsi que la direction du méridien. Puis, par une mesure d'angle, on en déduit l'azimut d'une direction de référence. Les positions des autres sommets de la triangulation sur l'ellipsoïde peuvent alors être calculées. Les coordonnées astronomiques du point fondamental permettent de fixer la position de l'ellipsoïde dans l'espace : il est tangent au géoïde, c'est-à-dire que la normale (la perpendiculaire) à l'ellipsoïde en ce point est confondue avec la verticale et que le méridien de l'ellipsoïde est confondu avec le méridien astronomique. Mais il faut bien voir que cette mise en place dans l'espace n'est que locale et que les points communs à deux triangulations pourront ainsi avoir des coordonnées quelque peu différentes dans chacune d'elles. À l'intérieur d'un même réseau, des différences peuvent apparaître entre les coordonnées géodésiques et astronomiques des points. Seules les coordonnées astronomiques sont absolues, les coordonnées géodésiques n'étant que relatives. Comme nous l'avons déjà expliqué, ces différences sont dues à la déviation de la verticale qui est l'angle entre la verticale et la normale à l'ellipsoïde.

L'idée de la triangulation s'imposa peu à peu chez les savants et il est difficile de dire qui fut son véritable créateur. Grâce à la boussole, inventée par les Chinois et transmise en Europe par les Arabes, les marins pouvaient s'éloigner des côtes et garder leur cap. En connaissant la direction du trajet et la distance parcourue (le loch, une corde de chanvre lestée, graduée par des nœuds et que l'on laisse filer, le permet) on pouvait ainsi établir des cartes. En 1533, dans la deuxième édition de son *Cosmograficus liber Petri Appiani (Apianus)*, Gemma Frisius (Dokkum, Pays-Bas, 8 décembre 1508 - Louvain, 25 mai 1555) donne en annexe un *Libellus de locorum describendorum ratione*, qui, en seize pages, fonde la géodésie moderne. Il explique comment des réseaux de triangles permettent d'arpenter des espaces aussi vastes qu'on le désire. Quatre ans plus tard, il décrit la construction de l'instrument dérivé de l'astrolabe destiné à ces mesures de terrain, le goniomètre, que son neveu Gualterus Arsenius (Clèves ?, ca. 1530 - Louvain, ca. 1580) améliorera, en 1572, en y ajoutant une boussole. Cette astrolabe, qui a appartenu

aux Médicis et se trouve au Musée de la science de Florence, possède dix tympans pour des latitudes différentes et va au-delà du tropique du Cancer contrairement aux astrolabes de la même époque. En Angleterre, William Cunningham en fait mention en 1559 dans son ouvrage *Cosmographical glasse*.

La triangulation fut perfectionnée en 1556 par le mathématicien Niccolò Tartaglia (Brescia, ca. 1499 - Venise, 13 décembre 1557) et mise en pratique par Jacob Roelofs, dit Jacob van Deventer (Kampen ou Deventer, ca. 1500-1505 - Cologne, 1575) pour réaliser des cartes des Pays-Bas entre 1557 et 1573. On pense que l'astronome danois Tycho Brahé (Knudstrup, 14 décembre 1546 - Prague, 24 octobre 1601) s'en servit en 1578 pour rattacher l'île de Hven, où se trouvait son observatoire d'Uraniborg, à la côte du Danemark. Johannes Kepler (Weil der Stadt, Wurtemberg, 27 décembre 1571 - Regensburg, 15 novembre 1630) en fit également usage. D'autres suivront en Angleterre, en Allemagne, en France, poussés par les progrès des instruments de mesure géodésique : le cercle hollandais de Jan Pietersz Dou (Leiden, 1573 - Leiden, 5 août 1635) et le graphomètre de Philippe Danfrie (Bretagne, ca. 1535 - Paris, ca. 1606), puis le théodolite, inventé en Angleterre peut-être dès le XVIe siècle et perfectionné par le mécanicien britannique Jesse Ramsden (Salterhebble, Yorkshire, 15 octobre 1735 - Brighton, 5 novembre 1800) au XVIIIe siècle.

La triangulation fut popularisée par le Hollandais Willebrord Snell Van Royen (Leiden, 1580 - Leiden, 30 octobre 1626), dit Snellius. En 1621, il effectua la triangulation de l'arc de $1°11'$ allant de Berg-op-Zoom à Alkmaar à l'aide de 33 triangles. Les angles étaient mesurés avec un arc-de-cercle de 3 pieds et demi de diamètre. La base, longue de 1.230 mètres, fut mesurée avec une chaîne et vérifiée avec une règle en bois. Il se servit d'un quadrant de 5 pieds et demi de diamètre pour déterminer la latitude de chaque extrémité. Il observa l'azimut à Leyde. Ses calculs, faits dans le plan, lui donnèrent 10.004 km pour le quart du méridien terrestre.

Signalons les triangulations de Wilhelm Schickard (Herrenberg, Wurtemberg, 22 avril 1592 - Tübingen, 24 octobre 1635) dans le Würtemberg en 1620, de Jean Tarde (1561 - 1636), chanoine théologal et vicaire général du diocèse de Sarlat, en 1621, de Richard Norwood (Stevenage, Yorkshire, octobre 1590 - Bermudes, 1675) entre Londres et York en 1635, de Giovanni Battista Riccioli et Francesco Maria Grimaldi (Bologne, 2 avril 1618 - Bologne, 28 décembre 1663) près de Modène en

1645. Ensemble, ces derniers firent également paraître une carte de la Lune dont la nomenclature est toujours en vigueur chez les astronomes.

La triangulation requérait de maîtriser le mieux possible les mesures angulaires. Elle ne prit véritablement son essor qu'au début du XVIe siècle avec l'introduction de la planchette en Angleterre et en Allemagne.

Le problème de la longitude

Depuis longtemps les marins savent déterminer la latitude grâce à la hauteur du Soleil et des étoiles au-dessus de l'horizon. Un capitaine peut ainsi tracer sa route facilement le long d'un parallèle.

On sait, depuis l'Antiquité, utiliser les éclipses pour mesurer les longitudes. Si l'on connaît l'heure exacte d'une éclipse en un certain lieu et qu'elle est observée à une heure différente là où l'on se trouve, on en déduit l'écart horaire et donc la différence de longitude. En 1514, l'astronome allemand Johannes Werner (Nuremberg, 14 février 1468 - Nuremberg, mai 1522) remarque qu'en une heure la Lune parcourt une distance à peu près égale à son diamètre. En établissant une carte des étoiles qui se trouvent sur le parcours de la Lune, on peut ainsi calculer l'heure à laquelle elle rencontre chaque étoile en un lieu donné et à une date donnée. En comparant avec l'heure à laquelle la Lune doit rencontrer une étoile particulière au point d'origine, on obtient l'écart en temps. Mais les positions des étoiles et les mouvements de la Lune n'étaient alors qu'imparfaitement connus. Entre 1571 et 1577, l'espagnol Juan Lopez de Velasco (Velasco, ca. 1530-1540 - Madrid, 1598) chercha à déterminer la position exacte du Nouveau Monde d'après les éclipses de 1577, 1578 et 1584.

La découverte des satellites de Jupiter et de leurs éclipses par Galileo Galilei, dit Galilée, (Pise, 15 février 1564 - Arcetri, 8 janvier 1642) multiplia les possibilités de mesures. Mais la distance de la Terre à Jupiter varie considérablement selon les saisons et Galilée pensait que la propagation de la lumière était instantanée. Et comment pointer un télescope depuis un navire ? De plus, les éclipses étaient un phénomène trop rare et les tables permettant d'effectuer les calculs ne furent établies que dans la seconde moitié du XVIIe siècle. L'astronome Edmund Halley (Haggerston, 29 octobre 1656 - Greenwich, 14 janvier 1742) suggéra de coupler déclinaison magnétique et latitude pour en déduire la longitude. Mais la déclinaison varie avec le temps ! Dans ses *Lettres à une*

princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie (il s'agit de Sophie Friederika Charlotte Leopoldine von Brandenbourg-Schwedt, 1745 - 1808), rédigées de 1760 à 1762 alors qu'il était à Berlin et publiées en trois volumes entre 1768 et 1772, Euler répertoria cinq méthodes de détermination de la longitude.

La détermination astronomique des coordonnées d'un point restera longtemps une opération difficile. Elles n'étaient connues que pour 200 points en 1760 et pour 1.540 en 1787. Les cartes de Ptolémée et d'Ératosthène, exactes quant aux latitudes, étaient très erronées pour les longitudes. C'est ainsi que l'on croyait la Méditerranée orientale plus longue de mille kilomètres que ce qu'elle est. L'erreur ne fut corrigée qu'en 1635 par Nicolas-Claude Fabri de Peiresc (Belgentier, 1er décembre 1580 - Aix-en-Provence, 24 juin 1637) qui avait organisé un réseau d'observation lui permettant de mesurer la différence de longitude entre Aix-en-Provence et Alep au nord-ouest de la Syrie.

La mesure de la longitude est un problème complexe car c'est une fonction du temps. En mer, pour calculer sa longitude, il faut comparer, au même instant, l'heure sur le navire et l'heure en un lieu terrestre de longitude connue qui sert d'origine. Puisque la Terre tourne de 360° en 24 heures, elle parcourt 15° en une heure. Ces 15° correspondent à une distance différente selon la latitude à laquelle on se trouve. À l'équateur, cette distance est de 1.650 km et chaque degré de latitude nord ou sud lui fait perdre 109,431 km à l'équateur et presque rien près des pôles. Chaque jour, le navigateur remet l'horloge de son bateau à l'heure de midi quand le Soleil atteint son apogée, puis il consulte l'heure de sa longitude terrestre d'origine sur la seconde horloge. La différence lui fournit sa longitude et la distance parcourue. Le premier à avoir mentionné cette possibilité pour obtenir la longitude semble être Gemma Frisius. Mais, ce qui peut maintenant sembler une opération banale ne l'était absolument pas autrefois, même à l'époque des horloges. Les meilleurs mécanismes se déréglaient sous l'influence des mouvements du bateau et des variations de température, de pression, de gravité, de magnétisme. Les marins s'échouaient ou faisaient naufrage ou, dans le meilleur des cas, n'arrivaient pas à la destination prévue. La détermination de la longitude présentait de réels problèmes pratiques en haute mer. Le temps passait et aucune solution satisfaisante n'apparaissait. Les gouvernements des grandes puissances maritimes promettaient des récompenses fabuleuses à qui résoudrait le problème.

Un naufrage dramatique relança la question. En 1707, l'amiral anglais Cloudesley Shovell (ca. novembre 1650 - 22 ou 23 octobre 1707), par temps de brouillard au nord des îles Scilly, pensait qu'il naviguait en pleine mer. La flotte s'échoua et plus de 2.000 hommes périrent. En 1714, le parlement britannique vota le *Longitude Act* et offrit un prix équivalent à plusieurs millions d'Euros pour un moyen « pratique et utile » pour déterminer la longitude. Il faudra attendre la mise au point du chronomètre de marine pour que ce problème reçoive une solution entièrement satisfaisante. Ce sera l'œuvre de John Harrison (Foulby, Yorkshire, 24 mars 1693 - Londres, 24 mars 1776) entre 1735 et 1757.

John Harrison, le fils d'un charpentier, naquit à Foulby, un village du Yorkshire, le 24 mars 1693. Rapidement, la famille déménagea pour Barrow-upon-Humber dans le Lincolnshire. Le jeune John apprit le métier de son père ainsi que la musique. Il lisait tout ce qu'il trouvait. Un pasteur de passage lui prêta une copie d'une série de conférences données par le mathématicien aveugle Nicolas Saunderson (Thurlstone, 9 avril 1682 - Cambridge, 19 avril 1739) à l'université de Cambridge. Harrison s'attacha à chaque mot et écrivit des légendes pour les figures afin de mieux comprendre les lois de la mécanique (il s'agissait peut-être de la machine à calculer inventée par Saunderson). On ne sait pour quelle raison, en 1713, Harrison construisit une horloge, ni comment il s'y prit ; elle était presque entièrement en bois. Deux autres horloges virent le jour en 1715 et 1717, toujours en bois. Entendit-il déjà parler de la récompense du parlement à cette époque, nul ne semble en être certain. En tous les cas, il avait acquis une certaine notoriété puisque, vers 1720, sir Charles Pelham (1679 - 6 février 1763), qui sera membre de la Chambre des communes de 1738 à 1754, lui demanda de construire une horloge dans une tour au-dessus des écuries de son manoir de Brocklesby Park. Le travail fut terminé en 1722. L'horloge fonctionne toujours car elle n'a pas besoin d'être lubrifiée, Harrison ayant utilisé du bois de padouk (*Pterocarpus*) qui secrète sa propre huile. On voit à quelle maîtrise il était parvenu !

Harrison s'associa avec son frère James, de onze ans son cadet, excellent artisan lui aussi et, de 1725 à 1727, ils construisirent ensemble des horloges dites de grand-mère. Leur précision était remarquable grâce à deux inventions de leur cru : la compensation à gril, qui faisait appel à deux métaux (acier et laiton) dont les dilatations différentes compensaient les effets des variations de température et l'échappement sauterelle qui fonctionnait avec de fortes amplitudes et était sujet à une erreur cir-

culaire, associé à un remontoir d'égalité qui assurait une force constante. Les deux frères vérifièrent l'exactitude de leurs horloges en effectuant des relevés astronomiques ; la variation était inférieure à une seconde en un mois ! Il était temps de prendre part à la course pour le prix.

John Harrison arrive à Londres pendant l'été 1730. Il rencontre Edmund Halley, l'Astronome royal qui dirige l'observatoire de Greenwich, et lui présente son projet d'horloge marine. Sachant très bien que la commission du prix serait favorable à une solution astronomique plutôt qu'à une solution mécanique, Halley adresse Harrison au célèbre horloger anglais George Graham (Rigg, Cumberland, 1673 - Londres 1751) qui lui apporte immédiatement son soutien financier. Le premier chronomètre de marine d'Harrison, appelé H1, est achevé en 1735. C'est essentiellement une version portable des anciennes horloges des deux frères, mais celle-ci est indépendante de la gravité. Le premier essai est effectué sur la rivière Humber et le modèle est présenté le 24 juin 1737 à la *Royal Society* de Londres par George Graham. Le règlement du prix prévoyait un essai sur un navire jusqu'aux Antilles, mais l'Amirauté fait attendre sa décision. Elle décide finalement de faire voyager le H1 et Harrison sur le *Centurion* en partance pour Lisbonne. À cause de la force des vents, le trajet ne prend qu'une semaine. Mais en arrivant à destination le capitaine meurt sans avoir consigné les résultats dans son livre de bord. Le retour dure un mois et le succès est total. Mais Harrison n'est pas entièrement satisfait de sa machine, qui n'avait cependant varié que de quelques secondes, et il demande deux ans de plus et une subvention.

Sa seconde horloge, H2, est présentée en janvier 1741 et on la soumet à une batterie de tests. La *Royal Society* est satisfaite, mais Harrison ne l'est toujours pas. Pendant onze ans il s'enferme pour construire sa troisième horloge, H3. La *Royal Society* l'encourage en lui décernant la prestigieuse médaille Copley, le 30 novembre 1749, et en l'élisant parmi ses membres. H3 comporte 753 pièces et plusieurs innovations techniques dont certaines, comme un nouveau système anti-friction par roulement à billes captif, sont encore utilisées de nos jours. Les dimensions et le poids sont réduits. En 1753, Harrison demande au fabricant de montres John Jefferys de lui réaliser, selon ses indications, une montre de gousset. Elle comporte des bandes bi-métalliques laiton-acier qui sont insensibles aux variations de température et elle fonctionne si bien qu'Harrison, toujours insatisfait, incorpore cette idée dans son horloge marine. C'est H4, terminée en 1759. Cette horloge est complètement différente des précédentes. Elle n'a que 13 cm de diamètre et ne pèse que 1,450 kg.

C'est presque une montre de poche. Remontée, elle fonctionne pendant trente heures d'affilée. L'un des problèmes majeurs avait été d'éliminer les frottements. Un assemblage méticuleux des pièces et le remplacement des rouages anti-friction et des sauterelles par des rubis et des diamants, y parviennent quelque peu. Mais il est toujours nécessaire de lubrifier l'horloge, ce qui réclame un entretien régulier. Au fur et à mesure qu'elle se répand dans le mécanisme, l'huile change de viscosité et d'acidité et stagne en certains endroits. Il faut démonter l'horloge tous les trois ans environ et remplacer les pièces usées. Elle est également sensible aux variations de température et aux mouvements brusques des navires. Mais c'est toujours le cas des montres et des horloges mécaniques produites de nos jours. Signalons qu'en 1863, l'astronome Antoine Joseph François Yvon-Villarceau (Vendôme, 15 janvier 1813 - Paris, 23 décembre 1883), proposera une méthode mathématique de correction des variations de température basée sur le développement en série de Taylor. Villarceau est également connu pour ses travaux sur la résolution numérique des équations algébriques et pour un théorème selon lequel quatre cercles passent par tout point d'un tore de révolution. Le premier cercle est méridien, il est situé dans un plan perpendiculaire à l'axe du tore ; le second est l'intersection du plan passant par le point et l'axe du tore. Les deux autres, appelés « cercles de Villarceau », sont obtenus en sectionnant le tore suivant deux plans qui lui sont tangents en ce point et passent par son centre. Ils coupent les méridiens et les parallèles du tore sous un angle constant. Ils étaient déjà connus des architectes depuis longtemps puisqu'on les retrouve dans l'escalier du Musée de la cathédrale de Strasbourg, œuvre de Hans Thoman(n) Uhlberger (1565 - 1608) vers 1578-1582.

Le 18 novembre 1761, William, le fils de John Harrison, s'embarque à bord du *Deptford* à destination des Antilles. Le voyage dure trois mois. Le bateau accoste à la Jamaïque le 19 janvier 1762. La montre présente un retard de 5,1 secondes, soit trois fois moins que la limite fixée par le *Longitude Act* de 1714. Mais la commission du prix n'est pas convaincue et ses membres demandent des explications techniques à Harrison. Le gouvernement français envoie une délégation à Londres pour convaincre Harrison de révéler ses secrets de fabrication. L'horloger parisien d'origine suisse, Ferdinand Berthoud (Plancemont-sur-Couvet, canton de Neuchâtel, 18 mars 1727 - Groslay, 20 juin 1807), en fait partie. À plusieurs reprises, il essaye d'obtenir des informations sur les techniques employées par Harrison en intriguant même auprès de Tho-

mas Mudge (Exeter, septembre 1715 - Newington Places, Londres, 14 novembre 1794), un horloger londonien réputé, ancien élève de George Graham. Accusé d'espionnage au profit de la France, Berthoud devient *persona non grata* outre-Manche et, revenu à Paris puis installé à Groslay, il ne fabriquera, entre 1760 et 1787, pas moins de quarante-cinq prototypes de chronomètres de marine, variant constamment les principes théoriques, les techniques horlogères et les procédés de fabrication. À Londres, Harrison est méfiant, il ne veut pas communiquer les détails de son horloge et demande de l'argent. Refus de la commission. Ses membres ne peuvent admettre qu'un autodidacte soit arrivé à résoudre le problème, surtout par des moyens qui ne font pas appel à l'astronomie. Son adversaire le plus farouche, et qui semble avoir été d'assez mauvaise foi dans toute cette affaire, est l'Astronome royal Nevil Maskelyne (Londres, 6 octobre 1732 - Greenwich, 9 février 1811) qui, depuis longtemps et à la suite de son prédécesseur et successeur d'Edmund Halley, James Bradley, prône une méthode de détermination de la longitude par évaluation de la distance lunaire. Toute la vie de Maskelyne sera d'ailleurs consacrée à la publication de tables nautiques et, en 1766, il commencera la publication annuelle de l'*Almanach nautique et éphémérides astronomiques* qu'il poursuivra jusqu'à sa mort. Ces tables paraîtront, avec succès, jusqu'en 1907 et l'Almanach subsiste encore de nos jours.

Finalement, en mars 1764, William s'embarque en direction de La Barbade pour de nouveaux essais qui doivent être certifiés par des experts. Cette fois-ci, la commission est forcée d'admettre le succès, mais une nouvelle loi du Parlement sur la longitude assortit la remise du prix de conditions supplémentaires. On veut bien lui accorder la moitié du prix s'il accepte de donner toutes ses horloges à la commission, de révéler ses secrets de fabrication et de superviser la production de deux copies de H4. Harrison est furieux et quitte de façon abrupte une séance de la commission. Il profère des menaces de poursuites judiciaires, mais accepte finalement de consigner par écrit le fonctionnement de H4 et promet de dévoiler le mécanisme de ses horloges devant un comité d'experts choisis par la commission. Ce comité se présente chez lui le 14 août 1765. Pendant six jours, Harrison doit démonter H4, donner des explications sur chaque pièce, puis remonter son horloge. À la fin de 1765, on lui octroie 10.000 Livres. En avril suivant, la commission voulant être certaine que la précision n'est pas le fait du hasard, décide d'une nouvelle campagne d'essais. Le 23 mai 1766, elle fait saisir toutes les horloges

au domicile d'Harrison et les transporte, sans trop de ménagements, à Greenwich. La commission désire maintenant savoir s'il est possible de construire d'autres horloges semblables à H4. Elle demande à Larcum Kendall (Charlbury, 21 septembre 1721 - Londres, 22 novembre 1795), un ancien apprenti de John Jefferys, d'en fabriquer une réplique. Ce sera K1, terminée en janvier 1770. Entre-temps, Harrison avait construit H5. Le roi George III, qui a connaissance des difficultés soulevées par la commission du prix, défend la nouvelle horloge et en fait lui-même entreprendre les essais en 1772. L'horloge est exacte au tiers de seconde près par jour. À la fin juin 1773, le parlement octroie enfin à Harrison les 8.750 Livres qui lui étaient encore dues, mais ne lui décerne toujours pas le prix. Un nouveau règlement est promulgué ; il est assorti de tellement de conditions que personne ne remporte le prix. Harrison se trouve finalement vengé quand, en juillet 1775, Cook, au retour d'un voyage de trois ans qui l'a conduit des tropiques à l'Antartique, fait un éloge appuyé de K1. John Harrison meurt le 24 mars 1776 à l'âge de quatre-vingt-trois ans. Sa bataille aura duré quarante-trois ans !

D'autres horlogers, comme Ferdinand Berthoud et son concurrent (et même adversaire acharné) Pierre Le Roy (Paris, 1717 - Vitry, 1785), prirent le relais. Les prix baissèrent. La production augmenta. En 1815, on estimait à 5.000 le nombre de ces chronomètres de marine, chaque navire en emportant plusieurs qui se contrôlaient mutuellement. Depuis 1766, les horloges d'Harrison étaient toujours à Greenwich. Une première restauration, sans trop de succès, fut entreprise en 1836. Puis, en 1920, le lieutenant-commandant Rupert Thomas Gould (Southsea, 16 novembre 1890 - Canterbury, 5 octobre 1948) de la *Royal Navy* se mit à la tâche. Elle fut immense et extrêmement difficile et délicate. Par exemple, trois jours furent nécessaires pour arriver à enlever les aiguilles de H4. L'extraction et la repose de l'échappement de H3 prit huit heures en moyenne. Sept ans seront nécessaires pour H3. Les restaurations de H1 se termineront le 1er janvier 1933. Elle fonctionne toujours dans la galerie de l'observatoire de Greenwich. (voir Biblio : Sobel et divers sites internet)

Le premier télégraphe électrique est construit en 1833 à Göttingen par Gauss et Wilhelm Eduard Weber (Wittenberg, 24 octobre 1804 - Göttingen, 23 juin 1891). Suivant une idée formulée en 1839 par Samuel Finley Breese Morse (Charlestown, Massachusetts, 27 avril 1791 - New York, 2 avril 1872), l'inventeur du code qui porte son nom, les officiers de

marine américains Charles Wilkes (New York, 3 avril 1798 Washington, 8 février 1877) et Henry Eld (New Haven, 1814 - 1850) en font usage en 1844 pour comparer l'heure entre Washington et Baltimore. L'année suivante, le procédé est adopté par le service naval des États-Unis.

De nombreuses années passeront avant qu'un autre bond en avant dans la détermination précise de la longitude se produise. Il proviendra de l'avènement de la radiotélégraphie et des travaux de Giuseppe Marconi (Bologne, 25 avril 1874 - Rome, 20 juillet 1937) à partir de 1905. Cette année-là, Émile Guyou (25 décembre 1843 - 24 août 1915) appliquera le téléphone à la détermination de la longitude de Brest depuis Paris. Le procédé sera ensuite couplé à la télégraphie pour fournir des résultats plus précis. Naturellement, à l'heure actuelle, toutes ces techniques sont dépassées.

L'aventure de la Méridienne

La mesure de la longueur du méridien présente un intérêt scientifique particulier. La question est de connaître la forme exacte de la Terre. Le problème était posé depuis que Jean Richer (1630 - Paris, 1696), astronome à l'Observatoire de Paris, en mission à Cayenne (5° de latitude nord) en 1672, avait remarqué que plus l'on s'approchait de l'équateur et plus ses horloges prenaient du retard. Donc le balancier allait plus lentement ou, en d'autres termes, la longueur du pendule battant la seconde était moins grande à Cayenne qu'à Paris. La pesanteur décroissait donc avec la latitude. Richer pensait que cela pouvait s'expliquer par un aplatissement de la Terre (Paris est plus rapproché du centre de la Terre que Cayenne ; donc le globe est aplati en allant vers les pôles) alors que Jean-Dominique (Gian-Domenico) Cassini (Perinaldo, 8 juin 1625 - Paris, 14 septembre 1712), premier directeur de l'Observatoire de Paris et fondateur de la lignée des astronomes de la famille Cassini, qui croyait en la sphéricité de la Terre, pensait que ce phénomène était dû à une différence de température. Les observations de Richer furent confirmées en 1682 par celles de Varin, Jean Deshayes (mort à Québec, le 18 décembre 1706) et Guillaume de Glos au cap Vert.

Les Cassini

Puisqu'il va en être largement question plus loin, arrêtons-nous un instant sur la famille Cassini. Elle régnera sur l'Observatoire de Paris

durant 4 générations : Cassini I (1671 - 1712), Cassini II (1712 - 1756), Cassini III (1756 - 1784), Cassini IV (1784 - 1793). Le fils de Cassini IV fut juriste et botaniste. Il n'eut pas d'enfant et la branche française de la famille s'éteindra avec lui.

Le fondateur de la dynastie est donc Jean-Dominique (Gian-Domenico) Cassini, appelé Cassini I, qui naît à Perinaldo, dans le Comté de Nice, le 8 juin 1625. Après des études de lettres, de théologie et de droit au collège des Jésuites de Gènes, il part à l'abbaye de San Fructuoso où il s'intéresse à l'astronomie, à l'astrologie et aux mathématiques, ainsi qu'à la poésie. En 1644, il est invité par Cornelio Malvasia, marquis de Bismontova (Bologne, 1603 - château de Panzano, 1664), qui inventera, en 1662, le réticule fait d'un treillis de fils d'argent qui permet des visées précises avec les lunettes astronomiques. Jean-Dominique travaille dans l'observatoire du Marquis à Panzano où les pères jésuites Giovanni Riccioli (Ferrare, 17 avril 1598 - Bologne, 25 juin 1671) et Francesco Grimaldi (Bologne, 2 avril 1618 - Bologne 28 décembre 1663) complètent son éducation. En 1650, il est nommé professeur de mathématiques et d'astronomie à l'université de Bologne où il remplace le célèbre Bonaventura Francesco Cavalieri (Verbania ou Milan, 1598 - Bologne, 30 novembre 1647). Il continue ses observations astronomiques et fait rectifier la direction du méridien de l'église San Petronio qui avait été établie par Ignazio Danti (Pérouse, avril 1536 - Alatri, 19 octobre 1586). Sa réputation est telle, qu'en 1657, le pape Alexandre VII lui demande conseil lors des négociations entre Bologne et Ferrare sur la régulation du Pô et du Reno. En 1663, le pape le nomme surintendant des fortifications puis, en 1665, surintendant des eaux. Le sénat de Bologne fait également appel à lui en plusieurs occasions. Ayant observé une comète inconnue en 1664, il émet une nouvelle théorie (d'ailleurs fausse) sur leurs orbites. À l'aide de lunettes astronomiques perfectionnées, il découvre les bandes nuageuses, les taches et l'aplatissement aux pôles de Jupiter et en mesure la durée de rotation. En 1666, il obtient la période de rotation de Mars à moins de 3 minutes près. Puis, en 1668, il publie des tables des satellites de Jupiter, mais y découvre des erreurs qu'il attribue à une vitesse finie de la lumière, avant de rejeter cette hypothèse. Ce sont ces mêmes tables qui permettront à Olaüs Roemer (Århus, 25 septembre 1644 - Copenhague, 19 septembre 1710) de calculer la vitesse de la lumière en 1676.

Les travaux de Cassini I lui ont assuré une réputation internationale. Colbert, qui cherche des correspondants étrangers pour la nouvelle Académie royale des sciences, lui propose d'en devenir correspondant

permanent. Cassini accepte. Colbert lui demande alors de venir à Paris pour un temps limité afin de l'assister dans la construction de l'Observatoire de Paris. Son voyage est payé (1000 écus), il sera logé gracieusement et recevra une pension de 9000 livres. Le sénat de Bologne et le pape acceptent de le laisser s'absenter pour une durée maximale de deux ans. C'est ainsi que, le 25 février 1669, il part pour Paris qu'il atteint le 4 avril. Quelques jours après, il est reçu par le Roi. Son français est hésitant, son caractère est autoritaire, il n'est pas très bien accueilli par certains académiciens jaloux de sa situation privilégiée auprès du Roi et, dans un premier temps, il n'essaie pas de s'adapter. Il ne pense rester que quelque temps. Cependant, peu à peu, les conditions de travail le séduisent et il veut faire modifier les plans de l'Observatoire de l'architecte Claude Perrault (Paris, 25 septembre 1613 - Paris, le 9 octobre 1688), le frère de l'auteur des contes Charles Perrault (Paris, 12 janvier 1628 - Paris, 16 mai 1703), pour mieux l'adapter aux observations astronomiques. Mais Perrault remporte la partie. Dès 1671, avant même son achèvement, Louis XIV lui en confie la direction. Il s'y installe et commence ses travaux d'observation à l'aide des instruments commandés par Colbert au célèbre opticien de Rome Giuseppe Campani (Castel San Felice près de Spoleto, 1635 - Rome, 28 juillet 1715). Malgré les rappels du Pape, il manifeste le désir de rester en France, obtient sa naturalisation en 1673 et change son prénom en Jean-Dominique. En novembre de la même année, il épouse Geneviève de Laistre, née à Clermont de l'Oise en 1643, fille du défunt Pierre de Laistre, Écuyer, Conseiller du roi et Lieutenant général du bailliage de Clermont dans l'Oise. Elle apporte en dot le château de Fillerval à Thury dans l'Oise. De ce mariage naîtront deux enfants Jean-Baptiste (mort en 1692) et Jacques (né à Paris en 1677).

Il commence alors à jouer un rôle actif à l'Académie des sciences, réussit à vaincre les oppositions et y gagne des collaborations essentielles. Il découvre quatre satellites de Saturne (Japet en 1671, Rhéa en 1672, Téthys et Dioné en 1684), ainsi que la division, dite de Cassini, de ses anneaux en 1675. Il donne la bonne explication de la consistance des anneaux qu'il imagine composés d'une multitude de petits satellites. Une opposition de Mars a lieu en 1672. En coordination avec Richer, à Cayenne, il mesure la parallaxe solaire avec seulement 10% d'erreur. En 1673, il évalue de façon précise la distance de la Terre au Soleil, grâce à un passage de Vénus devant le Soleil. En 1679, il dessine une grande carte de la Lune qu'il présente à l'Académie des sciences. Puis,

en 1683, il détermine la parallaxe du Soleil. Vers 1690, il est le premier à observer la rotation différentielle dans l'atmosphère de Jupiter. En 1693, il découvre les lois de la libration de la Lune, à la suite de Kepler et Johannes Hevelius (Dantzig, 28 janvier 1611 - Dantzig, 28 janvier 1687). En 1700, Cassini conçoit le projet de mesurer le méridien depuis Paris jusqu'à Perpignan. Son fils Jacques l'assiste.

En 1701, il fait construire une résidence d'été dans le hameau de Fillerval à Thury-sous-Clermont. Devenu aveugle en 1710, il meurt à Paris le 14 septembre 1712 et est inhumé à Saint-Jacques-du-Haut-Pas, sa paroisse.

Dans sa biographie de Cassini, François Arago (Estagel, 26 février 1786 - Paris, 2 octobre 1853), écrit

> *Après avoir donné l'indication des principales découvertes faites par les astronomes dont nous publions les biographies, nous avons cru toujours devoir placer en parallèle le récit de leurs erreurs. Ce chapitre, dans la biographie de Cassini, pourrait être assez étendu.*

Nous n'en donnerons pas la liste ici. Disons cependant qu'il proposa de remplacer les orbites elliptiques des planètes de Kepler par une autre courbe, qu'il nomma la *cassinoïde*. C'est cette courbe que le sculpteur Jean-Guillaume Moitte (Paris, 11 novembre 1746 - Paris, 2 mai 1810) a malencontreusement représentée sur la feuille que la statue de Cassini à l'Observatoire tient à la main. Mais les seuls scientifiques qui ne font jamais d'erreurs ne sont-ils pas ceux qui ne produisent jamais rien ?

Jacques Cassini, dit Cassini II, naît à Paris, peut-être à l'Observatoire, le 18 février 1677. C'est le fils du précédent. Il commence ses études avec son père avant de rejoindre le Collège Mazarin. Pierre Varignon (Caen, 1654 - Paris, 23 décembre 1722) y enseigne les mathématiques depuis 1688 et c'est lui qui supervise la thèse d'optique de Jacques, soutenue en août 1691, alors qu'il n'avait que quatorze ans. On ne sera pas surpris qu'il se dirige vers l'astronomie et soit admis comme « élève astronome » à l'Académie des sciences en 1694. Il accompagne son père dans ses nombreux voyages en Europe et le seconde dans ses travaux.

Admis à la *Royal Society*, en 1696, et à l'Académie de Berlin, il se lie d'amitié avec les astronomes britanniques John Flamsteed (Derby, 19 août 1646 - Greenwich, 31 décembre 1719), Halley et Newton qui, d'après sa théorie de la gravitation, prônait que la Terre était aplatie

aux pôles. On a vu qu'il assista son père dans la mesure du méridien entre Paris et Perpignan. Il en déduisit, faussement, que la Terre était allongée aux pôles, contrairement à ce que prévoyait Newton.

En 1710, il épouse Suzanne-Françoise Charpentier. Ils auront trois fils, Dominique-Jean, César-François, qui sera connu sous le nom de Cassini III ou Cassini de Thury, et Dominique-Joseph, ainsi que deux filles Suzanne-Françoise et Elisabeth-Germaine. L'aîné des fils, Dominique-Jean, succédera à son père à la chambre des Comptes tandis que le plus jeune embrassera une carrière militaire.

En 1712, il devient pensionnaire de l'Académie. L'année suivante, il propose une nouvelle méthode pour déterminer la longitude à l'aide des éclipses des étoiles et des planètes par la Lune et affirme que les degrés du méridien terrestre croissent de moins en moins de l'équateur aux pôles. Selon lui, la Terre est donc allongée vers les pôles, opinion à l'opposé de la théorie de Newton. Il entreprend de prolonger le méridien de Paris jusqu'à Dunkerque en 1718. Ses résultats, publiés dans *De la grandeur et de la figure de la Terre* (1720), le confirment dans son hypothèse que la Terre est allongée aux pôles. Pour faire taire les critiques, il lance, en 1733, la mesure d'une perpendiculaire au méridien entre Saint-Malo et Strasbourg. Puis, sous l'égide de l'Académie des sciences, il fait approuver et subventionner par Louis XV en 1735 deux expéditions pour mesurer la longueur d'un arc de méridien, celle du Pérou et celle de Laponie dont nous allons reparler. Il était toujours question de trancher entre Newton et lui !

Toute sa vie, malgré les preuves scientifiques irréfutables qui s'accumulent, il s'entêtera et refusera d'admettre qu'il a tort. Mais ces débats ne furent pas stériles ; ils montrèrent que le problème avait besoin d'être posé, que la question avait besoin d'être étudiée. D'ailleurs, en 1733, Giovanni Poleni (Venise, 23 août 1683 - Padoue, 15 novembre 1761) montrera que les erreurs expérimentales provenant des appareils de mesure ne permettaient pas de trancher entre la théorie de l'élongation proposée par Cassini et celle de Newton sur l'aplatissement. Signalons, qu'en 1738, Poleni, physicien et mathématicien de renom, installa le premier laboratoire de physique d'Italie, le *Teatro di filosofia sperimentale*, à l'université de Padoue. Au cours des vingt années suivantes, il y rassembla environ quatre cents instruments, soit achetés soit fabriqués sur commande à Venise ou à Padoue selon ses propres spécifications. Son laboratoire gagna une réputation internationale. Le Musée d'histoire de la physique de l'université de Padoue en possède encore une centaine.

En 1743, le pape Benoît XIV fit appel à lui et à l'architecte Luigi Vanvitelli (Naples, 12 mai 1700 - Caserte, 1er mars 1773) pour consolider la coupole de Saint-Pierre de Rome qui menaçait de s'effondrer.

Mais revenons à Cassini II. Comprenant l'inutilité de son opposition aux idées nouvelles, il abandonne progressivement ses activités scientifiques officielles à partir de 1740 et laisse à son fils, César-François, la direction de l'Observatoire ainsi que l'établissement de la carte de France, qu'il avait entrepris en 1733 sur l'ordre du Contrôleur général des finances Philibert Orry (Troyes, 22 janvier 1689 - La Chapelle-Godefroy, 9 novembre 1747) qui voulait établir le réseau routier sur des mesures exactes. Cependant, il n'arrête pas pour autant ses travaux astronomiques et, en 1738, il détermine les inclinaisons des orbites des satellites et de l'anneau de Saturne, et met en évidence la réalité du mouvement propre des étoiles. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages : *De la libration apparente de la Lune* (1721), *Du mouvement propre des étoiles fixes en longitude* (1738) et *Éléments d'astronomie* (1740). Ses travaux ne se cantonnent pas à l'astronomie et à la géodésie, mais il s'intéresse également aux applications des mathématiques, à l'électricité, aux baromètres, au recuit des armes à feu et aux miroirs.

Jacques Cassini exerça également d'importantes charges administratives : il fut nommé Maître ordinaire de la chambre des Comptes en 1706, puis Magistrat à la chambre de Justice en 1716, et enfin Conseiller d'État en 1722. Dans ces fonctions, il acquit une grande réputation d'honnêteté et de sérieux, mais aussi d'indécision.

Le 15 avril 1756, alors qu'il se rend dans sa propriété de Thury, sa voiture verse ; il décède des suites de cet accident le lendemain, 16 avril. Il est inhumé dans la chapelle de la Vierge de l'église de Thury.

César-François Cassini, dit Cassini III ou Cassini de Thury, est né au château de Thury-sous-Clermont, le 17 juin 1714. C'est le fils de Jacques. Il est élevé par son grand-oncle Giacomo Filipo (Jacques-Philippe) Maraldi (Perinaldo, 21 août 1665 - Paris, 1er décembre 1729) et montre rapidement des dons pour l'astronomie.

Il commence par assister son père dans la mesure du parallèle que celui-ci conduit entre Saint-Malo et Strasbourg au plus fort de la querelle avec Newton. L'Académie l'admet comme assistant surnuméraire en 1735. Il devient assistant régulier en 1741, associé dans la Section de mécanique, puis pensionnaire dans la Section d'astronomie en 1745. En 1739-1740, il entreprend une nouvelle mesure du méridien de Paris avec

une très grande précision et utilise de nombreux points pour sa triangulation. Ses mesures, publiées en 1744 dans son ouvrage *La méridienne de l'Observatoire royal de Paris vérifiée dans toute l'étendue du royaume*, montrent que la Terre est aplatie aux pôles. S'opposant à son père, il se range alors du côté de Newton.

Cassini épouse, en 1747, Charlotte Drouin de Vandeuil, dont il a deux enfants, Jean-Dominique (Cassini IV) et Françoise Élisabeth.

La France et l'Autriche étaient en guerre pour une raison complexe (y a-t-il toujours, d'ailleurs, une raison simple aux conflits ?) concernant la succession autrichienne. Cassini III établit, en 1746-1747, des cartes des Pays-Bas et des Flandres. Quand il les voit, Louis XV est immédiatement convaincu de l'importance primordiale de disposer de cartes fiables et précises et demande à César-François d'en établir pour la France, toutes à la même échelle de 1/86.400e. Le but est double : mieux connaître le royaume pour mieux le gouverner et améliorer le réseau routier.

Cassini monte le projet, établit le plan des travaux, met au point l'emploi du temps des ingénieurs et décrit avec minutie les différentes tâches qu'ils doivent accomplir et effectue un recensement général des toponymes qui reflète les usages locaux. Il estime qu'il lui faudra vingt ans pour mener à bien le travail. L'argent est octroyé, le travail commence en 1750. Le but n'est pas véritablement topographique, mais plutôt géographique. Il s'agit seulement de positionner les lieux les uns par rapport aux autres. Des tableaux contenant les mesures des angles et les longueurs des côtés des triangles sont dressés. Les travaux des ingénieurs sont soumis à un double contrôle. Mais la guerre de Sept Ans interrompt le financement en 1756. Le roi accepte qu'une souscription soit ouverte, les souscripteurs auront les droits de la carte pendant trente ans. Cinquante personnes, dont le roi et la marquise de Pompadour fournissent des fonds, des provinces également. Le travail reprend, des difficultés financières surgissent car les provinces qui avaient versé de l'argent exigent la réalisation de cartes spécifiques. L'aventure durera trente ans et sera terminée par son fils Jean-Dominique Cassini IV.

C'est la fameuse *Carte de Cassini*. Composée de 182 feuilles gravées à l'eau-forte, elle est publiée, sous l'égide de l'Académie des sciences, de 1744 à 1793. Bien que ce soit une réalisation tout à fait remarquable pour l'époque, l'ensemble manque d'homogénéité. Des différences importantes existent entre les différentes feuilles et, parfois, au sein d'une même feuille. Certaines zones sont bien détaillées alors que d'autres sont traitées sommairement. Des villages sont complètement isolés, sans

moyen visible de communication. Les signes toponymiques ne sont pas partout identiques. La représentation du relief (l'orographie) est médiocre. La haute montagne est indiquée par des coteaux ayant la forme de bourrelets et reliés par des gradins à des vallées à fond plat. Il est évident qu'ingénieurs, dessinateurs et graveurs ne savaient pas comment rendre les montagnes et ont renoncé à une description correcte. Enfin, la qualité de la gravure est très inégale d'une feuille à l'autre. Malgré ses défauts, cette carte est une réalisation exceptionnelle qui n'a pu être menée à bien que grâce à l'ardeur infatigable de Cassini de Thury. Elle rendra d'immenses services pendant plus d'un siècle et servira de modèle à tous les travaux analogues entrepris par la suite en Europe.

Depuis 1748, Cassini était Maître ordinaire à la chambre des Comptes et Conseiller du Roi. Il fut membre étranger de la *Royal Society* et de l'Académie de Berlin. En 1771, lorsqu'il reçoit officiellement le titre de directeur de l'Observatoire (que son père et son grand-père n'avaient pas car l'Observatoire était alors sous la responsabilité directe de l'Académie des sciences), Cassini III obtient explicitement la possibilité d'habiter dans l'appartement du premier étage, avec un droit héréditaire.

César-François Cassini III meurt de la variole à Paris le 4 septembre 1784.

Ses travaux astronomiques sont restés modestes. Il a publié des mémoires sur la théorie de Mercure, la figure de la Terre et sur des observations de comètes. Il est avant tout connu comme géodésien et cartographe de grand talent.

Le dernier de cette lignée d'astronomes, Jean-Dominique Cassini, dit Cassini IV, naît à l'Observatoire de Paris le 30 juin 1748. Il fait ses études secondaires au Collège du Plessis à Paris, puis chez les Oratoriens à Juilly, un établissement destiné à former des prêtres. Mais il n'a pas la vocation et préfère la physique, les mathématiques et... l'astronomie.

En 1768, on l'envoie tester le nouveau chronomètre de marine de l'horloger Pierre Le Roy destiné à la mesure des longitudes. Le voyage le conduit en Amérique et sur les côtes de l'Afrique. À son retour, en 1770, il publie *Voyage fait par ordre du roi en 1768 pour éprouver les montres marines inventées par M. Le Roy*. La même année, le 23 juillet, il est élu Adjoint à l'Académie des sciences. Assuré, héréditairement, d'être nommé directeur de l'Observatoire de Paris au décès de son père, il commence à le seconder pour l'établissement de la carte de France. En 1773, Cassini se marie avec Claude-Marie-Louise de la Myre-Mory.

Ils auront cinq enfants : Cécile, Angélique, Aline, Alexis, et Alexandre-Henri-Gabriel (Paris, 9 mai 1781 - mort du choléra, le 16 avril 1832) qui publiera, en 1826, ses *Opuscules phytologiques* qui lui vaudront d'entrer à l'Institut en 1827.

À la mort de son père, en 1784, Cassini IV est nommé directeur de l'Observatoire. Il persuade Louis XVI d'en restaurer le bâtiment. En 1785, il veut réorganiser les observations météorologiques, il insiste sur leur nécessité et ajoute, dans l'un de ses Mémoires,

> *Ce n'est qu'en faisant les observations avec suite, avec assiduité, et avec un détail presque minutieux, que l'on pourra peut-être enfin découvrir quelque jour certaines lois, certaines périodes, dont la connaissance sera du plus grand intérêt pour l'agriculture, la médecine...*

Des observations systématiques seront, par la suite, effectuées avec beaucoup de constance par Alexis Bouvard (Les Contamines-Montjoie, 27 juin 1767 - Paris, 7 juin 1843) et François Arago.

Cependant, la tâche principale de Cassini IV est de terminer la carte de France. En 1787, il est chargé, avec Legendre et Pierre Méchain (Laon, 16 août 1744 - Castellón de la Plana, Espagne, 20 septembre 1804), de raccorder les méridiens de Greenwich et de Paris. La triangulation commence, la Révolution aussi. Le 16 juillet 1789, environ trois cents hommes armés envahissent l'Observatoire à la recherche de nourriture, d'armes et de munitions. Ils obligent Cassini à les emmener dans les caves où ils ne trouvent rien. Ils enlèvent alors le plomb des toits pour fabriquer des balles. Entre novembre 1789 et février 1790, de vives discussions ont lieu à l'Assemblée constituante. Il s'agit de découper la France en départements, arrondissements et cantons. La nouvelle carte est publiée en 1790 par Louis Capitaine (1749 - 1797), fils de l'un des ingénieurs de la carte de Cassini sur laquelle elle est basée. Selon Cassini IV, les *ingénieurs et les graveurs... passèrent plusieurs jours et autant de nuits à l'exécution* [de cette carte]. Sa femme meurt en 1791.

Le système métrique est institué. Il faut définir le mètre. L'Académie charge Cassini, Legendre et Méchain de ce travail. Il faut reprendre les mesures déjà effectuées avec plus de précision grâce au cercle répétiteur dû à Jean Charles Borda (Dax, 4 mai 1733 - Paris, 19 février 1799). Devant s'occuper seul de ses cinq enfants, il propose de superviser le projet, mais tout en restant à Paris. L'Académie refuse et Cassini se démet de ses fonctions le 6 septembre 1793. Il est foncièrement attaché

à la monarchie. Dénoncé par le Comité révolutionnaire de Beauvais, il est incarcéré durant sept mois, de février 1794 à août 1794, au couvent des Bénédictins anglais de la rue Saint-Jacques. Remis en liberté, il se retire dans son château de Thury. Il refuse sa nomination au Bureau des longitudes en 1795, démissionne de l'Institut en 1796, mais accepte, en 1799, son élection comme membre de la Section d'astronomie de la nouvelle Académie des sciences. Il renonce à son travail scientifique et se consacre à des écrits polémiques pour défendre le prestige scientifique de sa famille et justifier son attitude. Il publie, en 1810, les *Mémoires pour servir à l'histoire des sciences et à celle de l'Observatoire royal de Paris*. C'est un document précieux, fondé sur des archives personnelles aujourd'hui disparues, et qui est également intéressant par sa relation de la façon dont il avait vécu la période révolutionnaire.

Maire de Thury, juge de paix du canton de Mouy, il se consacre à ses administrés. Il sera pensionné et décoré par Napoléon, qui le nommera sénateur et comte d'Empire, puis par Louis XVIII. Il meurt à Thury-sous-Clermont le 18 octobre 1845 à quatre-vingt-dix-sept ans.

Premières mesures

En 1668, l'Académie des sciences de Paris fut chargée par Jean-Baptiste Colbert (Reims, 29 août 1619 - Paris, 6 septembre 1683), son fondateur, d'effectuer une nouvelle mesure du méridien et d'établir une carte de France plus exacte que celles qui existaient alors. Cette détermination commença en 1669, deux ans après la fondation de l'Observatoire de Paris, entre autre chargé des travaux cartographiques. Elle fut confiée à l'astronome, académicien et abbé Jean Picard (La Flèche, 21 juillet 1620 - Paris, 12 octobre 1682). Ce spécialiste de géodésie s'était rendu en Norvège, à Uranienborg, là où Tycho Brahé (Knudstrup, 14 décembre 1546 - Prague, 24 octobre 1601) avait fondé son observatoire, afin de mesurer avec précision sa position et, par là, de pouvoir utiliser les observations des 777 étoiles qui servirent aussi à Johannes Kepler à découvrir les lois régissant le mouvement des planètes. Il rédigera deux importants traités, *La mesure de la Terre* (1671) et *Traité du nivellement* (1684), édité après sa mort par Philippe de La Hire (Paris, 18 mars 1640 - Paris, 21 avril 1718). Avec Adrien Auzout (Rouen, 28 janvier 1622 - Rome, 23 mai 1691), il avait inventé, en 1667, l'alidade holométrique dans laquelle la visée s'effectuait à l'aide d'une lunette comportant une

règle à éclimètre et qui servait pour les levés à moyenne et grande échelle. Il était donc parfaitement qualifié pour cette mission.

Les limites fixées à Picard pour ses mesures sont Malvoisine, au sud de Paris, à 6 km de La Ferté-Alais, et Sourdon, à 20 km au sud d'Amiens. Il effectue le travail en 1669 et 1670 en utilisant 13 triangles et deux bases, dont une pour la vérification des mesures. La base principale, de 11 km, s'étend entre Villejuif et Juvisy ; elle est mesurée par arpentage, à l'aide de deux perches de bois (moins sensibles aux variations d'humidité que la corde) de 8 mètres. Il trouve, pour la longueur du degré de méridien, 57.060 toises du Châtelet (1 toise = 194,904 cm), ce qui conduit à 111.092 mètres ; la valeur exacte, à la latitude moyenne entre Paris et Amiens, est de 111.220 mètres. Il avait eu de la chance car ses erreurs de mesure s'étaient compensées !

Le méridien de Paris, *la Méridienne* comme on l'appelle, qui passe par le centre de l'Observatoire de Paris, devait être déterminé avec la plus grande précision possible sur l'ensemble du territoire. Les expéditions précédentes n'étaient pas suffisantes. La Méridienne de Picard fut donc prolongée au nord jusqu'à Dunkerque et au sud jusqu'à Collioure par Jean-Dominique Cassini et Philippe de La Hire. Leur travail fut continué par leurs fils Jacques Cassini et Gabriel-Philippe de La Hire (Paris, 25 juillet 1677 - Paris, 4 juin 1719) et le neveu de Cassini, Giacomo Filipo (Jacques Philippe) Maraldi. Il dura de 1683 à 1718. Utilisant une nouvelle méthode de détermination de la longitude au moyen des éclipses des étoiles et des planètes par la Lune qu'il avait mise au point en 1713, Jacques Cassini calcula que le degré de méridien était plus long au sud de Paris qu'au nord. La Terre n'était donc pas une sphère parfaite, mais elle était allongée vers les pôles. Il calcula l'excentricité et trouva 0,144. Ces résultats semblaient être confirmés par la mesure de l'arc de parallèle entre Saint-Malo et Strasbourg qui s'effectua en 1733 - 1734. Cassini s'entêta dans cette opinion jusqu'à sa mort en dépit des évidences de sa fausseté qui lui étaient présentées. Il semble que le premier à avoir formulé l'hypothèse de l'allongement vers les pôles ait été Johann Caspar Eisenschmidt (Strasbourg, 25 septembre 1656 - 4 décembre 1712) dans son ouvrage *Diatribe de figura telluris*, paru à Strasbourg en 1691.

On a souvent affirmé qu'Isaac Newton avait eu connaissance des résultats de Picard en 1684 et s'en était servi pour confirmer ses lois de la gravitation universelle. D'après sa théorie, exposée dans son livre *Philosophiae naturalis principia mathematica* paru en 1687, la force cen-

trifuge entraîne l'aplatissement de la Terre au pôles. Pour arriver à cette conclusion, Newton calcule le renflement que la partie liquide de la Terre à l'équateur doit présenter par rapport aux pôles afin que les mers soient en équilibre en admettant qu'un ellipsoïde de révolution est une surface d'équilibre. Il suppose, pour son raisonnement, qu'il existe deux canaux allant du centre de la Terre à la périphérie, l'un équatorial et l'autre polaire. En supposant une forme ellipsoïdale et homogène, il exprime ensuite que le poids total de l'eau est le même dans chacun des canaux. Il trouve ainsi un aplatissement de 1/230. Rappelons que l'aplatissement est donné par la formule $\alpha = (a - b)/a$ où a est le demi-axe équatorial de l'ellipse et b son demi-axe polaire. Les dernières mesures lui donnent la valeur de $1/298,257$.

En France, les idées de Newton furent défendues par Pierre Louis Moreau de Maupertuis (Saint-Malo, 28 septembre 1698 - Bâle, 27 juillet 1759). Dans le mémoire *Discours sur les différentes figures des astres*, publié en latin dans les *Philosophical Transactions* (vol. 422 (1732) pp. 240-256), il démontre qu'une masse fluide homogène, tournant autour d'un axe et dont les parties sont attirées vers le centre proportionnellement à une puissance quelconque de leur distance à celui-ci, ne peut, à l'équilibre, que prendre la forme d'un ellipsoïde aplati aux pôles. Pierre Bouguer, un élève du mathématicien, astronome et géophysicien Jean-Jacques Dortous de Mairan (Béziers, 26 novembre 1678 - Paris, 20 février 1771), contestait les hypothèses sur lesquelles Maupertuis appuyait son argumentation. Il montrait que le problème était plus complexe que ne le laissait suggérer le *Discours*. C'était également la conclusion que l'on pouvait tirer de l'*Essai d'une nouvelle physique céleste* (1735) de Johann Bernoulli (Bâle, 27 juillet 1667 - Bâle, 1er janvier 1748) qui concluait que la Terre était un sphéroïde allongé aux pôles. Maupertuis cherchait une confirmation géodésique à sa conclusion sur l'aplatissement et, entre 1733 et 1736, il présenta à l'Académie des sciences quatre mémoires sur la manière de conduire ces mesures. Son idée, suggérée par la lecture d'une recension d'un travail de Poleni, était de déterminer le rapport entre les deux axes de l'ellipsoïde. Signalons que Maupertuis s'intéressa également aux erreurs de mesure qui peuvent se produire et sur les procédés qui permettent d'en diminuer les conséquences. On peut voir, dans ces travaux, les origines de la théorie de l'optimisation. (voir Biblio : Blay-Halleux).

Les expéditions lointaines

La question de la longueur du méridien était donc d'importance pour trancher entre les tenants de Cassini et ceux de Newton. La controverse dura plusieurs décennies. Comme nous l'avons vu, Giovanni Poleni fit remarquer, en 1733, que les erreurs de mesure dues à la précision des instruments ne permettait pas de trancher entre les deux hypothèses. Seules de nouvelles mesures pouvaient départager les deux camps. À la suite de la *Proposition d'une mesure de la Terre* formulée en 1735 par le géographe du Roi, Jean-Baptiste Bourguignon d'Anville (Paris, 11 juillet 1697 - Paris, 28 janvier 1782) et appuyée par le cardinal de Fleury et le comte de Maurepas, trois expéditions furent organisées. Les péripéties, les aventures et même les drames n'en furent pas absents.

L'une, dirigée par Maupertuis et comportant le physicien et astronome suédois Anders Celsius (Uppsala, 27 novembre 1701 - Uppsala, 25 avril 1744), le mathématicien et géomètre Charles Étienne Louis Camus (Crécy-en-Brie, 23 août 1699 - Paris, 2 février 1768), Pierre Charles Lemonnier (Paris, 20 novembre 1715 - Bayeux, 3 avril 1799), qui deviendra astronome particulier de Louis XV et sera le beau-père de Joseph-Louis Lagrange, et le mathématicien français Alexis-Claude Clairaut (Paris, 7 mai 1713 - Paris, 17 mai 1765), l'un des amis de la marquise Émilie du Châtelet (il l'aida à traduire en français les *Principia* de Newton), partit de Paris pour Stockholm le 20 avril 1736. Elle se fixa en Laponie, près du pôle boréal, en 1737-1738 et sera de retour le 20 août 1737. Ces hommes mesurèrent un arc de $57'$ entre Kittis et Tornéa. Revenu en France, Maupertuis s'attribua tous les mérites de l'expédition.

La seconde mission, sous la direction de l'astronome Louis Godin (Paris, 28 février 1704 - Cadix, 11 septembre 1760), avec Pierre Bouguer, Joseph de Jussieu (Lyon, 3 septembre 1704 - Paris, 11 avril 1779), frère du célèbre botaniste Antoine de Jussieu (Lyon, 6 juillet 1686 - Paris, 22 avril 1758), et l'explorateur et scientifique Charles Marie de La Condamine (Paris, 28 janvier 1701 - Paris, 4 février 1774), opéra près de l'équateur, au Pérou, de 1735 à 1744, et mesura un arc de $3°7'$ entre Tarqui et Cochasqui. Cette expédition donna lieu à un controverse avec l'Espagne. Philippe V avait accordé toutes les facilités à l'équipe française. Mais il avait tenu à ce que deux officiers de sa marine l'accompagne. Il s'agissait de jeunes lieutenants, issus de nobles familles, Jorge Juan y Santacilia (Novelda, 5 janvier 1713 - Madrid, 21 juin 1773) et Antonio de Ulloa (Séville, 12 janvier 1716 - Cadix, 3 juillet 1795).

Ils n'avaient aucune notion de géodésie au départ, mais les connaissances acquises pendant l'expédition leur permettront de faire ensuite de brillantes carrières. Le voyage de Paris à Quito dure plus d'un an. Après des arrêts en Martinique, Saint-Domingue et Carthagène, ils arrivent à Panama le 29 décembre 1735, puis à Manta, port de la province de Quito sur le Pacifique, le 10 mars 1736. L'expédition se sépare en deux pour atteindre Quito et ne s'y rejoint que le 10 juin 1736. L'arc méridien choisi pour les mesures suivait une haute vallée perpendiculaire à l'équateur et s'étendait de Quito, au nord, à Cuenca, au sud. La base de la triangulation est mesurée dans la plaine de Yaruqui du 3 octobre au 3 novembre 1736. Tous retournent à Quito en décembre. Les subsides attendus de Paris n'arrivent pas. La Condamine avait prévu des lettres de change sur une banque de Lima et s'y rend le 28 février 1737. Il y reste pour observer l'arbre à quinquina mal connu en Europe et ne revient à Quito que le 20 juin 1737. Des dissensions s'élèvent entre les membres de l'expédition. Leurs intérêts divergent trop et elles sont attisées par des querelles personnelles. Godin, qui n'a que 31 ans alors que La Condamine en affiche 34 et Bouguer 37, ne tient pas ses hommes assez fermement. Il refuse de communiquer ses résultats à ses collègues, alors que La Condamine et Bouguer collaborent. Les mesures, prises dans un environnement montagneux difficile, se terminent en août 1739. Quatre ans sont nécessaires pour déterminer les latitudes des stations extrêmes et l'amplitude totale de l'arc. Les mésententes augmentent. Godin continue à travailler seul. En décembre 1741, Bouguer trouve une erreur dans les calculs de La Condamine et la corrige, ce qui déclenche une dispute entre les deux hommes qui, désormais, vont travailler séparément. Les travaux sont terminés en 1743.

Le retour en France s'effectue de façon disparate, chacun suivant sa propre voie. Bouguer revient le premier à Paris. La Condamine descend l'Amazone. Il rejoint Para puis Cayenne, mais, ne trouvant pas de bateau, il y reste cinq mois et en profite pour effectuer des observations astronomiques et topographiques et étudier l'histoire naturelle et l'ethnologie. Il découvre le caoutchouc et le curare. Il quitte finalement Cayenne en août 1744, arrive à Amsterdam le 30 novembre 1744 et à Paris en février 1745. Il rapporte de nombreuses notes, des spécimens d'histoire naturelle et divers objets d'art qu'il offre à Buffon (Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, Montbard, 7 septembre 1707 - Paris, 16 avril 1788). Joseph de Jussieu parcourt l'Argentine et le Paraguay à la recherche de collections botaniques. Juan et Ulloa s'embarquent

chacun sur un navire et doublent le cap Horn. La France et l'Espagne étant en guerre, ils en subissent les conséquences. Après son retour, Godin demeure silencieux. Mais Bouguer et La Condamine s'invectivent au travers de mémoires et de libelles, faisant ainsi plus pour leur célébrité que leurs travaux scientifiques. Le décès de Bouger en 1758 met fin à la polémique. Deux arcs avaient été calculés, l'un par Bouguer et La Condamine, l'autre par Godin et les officiers espagnols. Ce dernier n'a jamais été utilisé pour la détermination de l'ellipsoïde terrestre. Par contre, celui de Bouguer servit dans tous les calculs ultérieurs, en particulier lors de l'établissement du système métrique, car c'était la seule mesure effectuée au sud de l'équateur. À la même époque, l'astronome Jean Baptiste Joseph Delambre (Amiens, 19 septembre 1749 - Paris, 19 août 1822) calcula un nouvel arc en utilisant tous les résultats disponibles de l'expédition du Pérou. C'est cet arc qui a été adopté comme surface de projection dans l'établissement de la carte de France au 1/80.000e, dite carte d'État-Major. (voir Biblio : Perrier).

Enfin une troisième expédition s'en alla au cap de Bonne-Espérance en 1752 sous la conduite de l'abbé Nicolas Louis de La Caille (Rumigny, Champagne, 15 mars 1713 - Paris, 21 mars 1762), connu pour sa méthode de détermination de la longitude à l'aide des distances lunaires. Un arc de $1°13'$ fut mesuré. Les mesures étaient erronées à cause de la forte déviation locale de la verticale. Cependant certains, se fondant sur la grande réputation d'observateur de La Caille, les regardaient comme exactes. Elles furent ainsi l'objet de nombreuses controverses, car on était en droit d'en déduire que la forme de la Terre n'était pas la même dans les deux hémisphères.

La précision des mesures a augmenté ; en particulier les positions des étoiles sont mieux connues grâce à l'emploi de micromètres. Bien que l'aplatissement obtenu (1/215) soit trop fort, les résultats de ces expéditions, combinés à la mesure de l'arc de parallèle entre Sète et la montagne Sainte-Victoire près d'Aix-en-Provence, donnèrent raison à Newton. Les mesures des Cassini n'avaient pas été faites avec assez de soin comme l'avait déjà souligné Delambre. La mesure fut donc révisée en 1739-1744 entre Dunkerque et Collioure. Cette opération est connue sous le nom de *Méridienne vérifiée.* César-François Cassini de Thury (Thury, 17 juin 1714 - Paris, 4 septembre 1784), le fils de Jacques Cassini, y prit part. La conclusion fut la même : la Terre est aplatie aux pôles. Cassini de Thury se rallia à cette vue, s'opposant ainsi à sa famille. Mais certaines idées fausses ont la vie dure, comme celle de la possible quadrature du

cercle. C'est ainsi qu'en 1784, dans ses *Études de la nature*, Jacques-Bernardin-Henri de Saint-Pierre (Le Havre, 19 janvier 1737 - Éragny-sur Oise, 21 janvier 1814), l'immortel auteur de *Paul et Virginie* paru en 1787, affirmait toujours, avec de prétendues preuves scientifiques à l'appui, que la Terre était renflée aux pôles (voir la figure, p. 550, tome 3). Des mesures de perpendiculaires à la Méridienne furent également menées à bien. Au terme de ces travaux, la France était couverte d'un réseau de près de huit cents triangles reliant les principales villes. La cartographie scientifique pouvait commencer.

Vers la même époque, d'autres arcs furent mesurés. Celui de Maire et Boscovich, dans les États pontificaux, entre Rome et Rimini, de 1750 à 1755. Les deux arcs du père Liesegang, en Autriche entre Warasdin et Brünn et en Hongrie entre Czurock et Kisteleck, de 1750 à 1769. L'arc de Giambattista Beccaria (Mondovi, 1716 - Turin, 1781), au Piémont en 1759 et, les années suivantes entre Mondovi et Andrate. Enfin, l'arc de Charles Mason (Oakridge Lynch, Gloucestershire, avril 1728 - Philadelphie, 25 octobre 1786) et Jeremiah Dixon (Cockfield, County Durham, 27 juillet 1733 - Cockfield, 22 janvier 1779) en Pennsylvanie et au Maryland en 1764 dont la longueur fut obtenue uniquement par jalonnement et mesure directe au sol.

Les débats reprennent à la *Royal Society* de Londres, cette fois à propos de l'influence de la déclivité de l'océan. Les écarts entre les différentes mesures semblent erratiques. Des doutes sur la validité de la théorie newtonienne sont émis. Il est nécessaire d'entreprendre des observations systématiques sur la déviation du fil à plomb par les montagnes. L'Astronome royal Nevil Maskelyne charge Mason de repérer en Écosse une montagne isolée, homogène, de hauteur suffisante, accessible au nord et au sud et s'étendant d'est en ouest dans une vallée sablonneuse plate. Le Schiehallion (1.083 m) est choisi. Entre le 30 juin et le 20 octobre 1774, Maskelyne et son assistant Reuben Burrow (1747 - 1792) effectuent les mesures dans des conditions climatiques difficiles. Burrow les continue jusqu'à l'hiver avec l'aide de William Menzies, un arpenteur local. Le 26 juillet 1775, Maskelyne présente ses résultats à la *Royal Society* ; il confirme la théorie newtonienne et fournit même une estimation de la densité terrestre moyenne (entre $4,5$ et 5, alors que la valeur admise aujourd'hui est de $5,52$) que certains croyaient creuse. Pour ce travail, on lui décerne la médaille Copley, le 30 novembre suivant. Charles Hutton (Newcastle-upon-Tyne, 14 août 1737 - Londres, 27 janvier 1823), professeur de mathématiques à la *Royal Military Academy*, est chargé du

dépouillement des mesures. Au bout de deux ans, après avoir représenté les positions des points sur une carte, préfiguration des courbes de niveau, il confirme les résultats. (voir Biblio : Fauque)

La figure de la Terre

Parallèlement aux mesures sur le terrain, les scientifiques poursuivent leurs travaux théoriques. En 1690, le hollandais Christiaan Huygens (La Haye, 14 mars 1629 - La Haye, 8 juin 1695) se base, comme Newton, sur deux canaux, l'un équatorial et l'autre à une latitude quelconque. Il obtient un aplatissement de 1/578 (près de deux fois plus faible que celui actuellement mesuré) et arrive à la même valeur, que l'attraction soit constante ou qu'elle suive la loi de Newton.

James Stirling (Garden, Stirlingshire, Écosse, mai 1692 - Édimbourg, 5 décembre 1770), en 1735, écrit les équations d'équilibre d'un liquide homogène qui tourne autour d'un axe, en supposant que la résultante de la force centrifuge et de la force d'attraction est, en tout point, normale à cette surface. En première approximation, la solution est un ellipsoïde aplati et il donne la relation entre l'aplatissement et la vitesse angulaire de rotation.

Deux ans plus tard, Clairaut obtient une relation entre aplatissement, pesanteur au pôle et à l'équateur, grand axe et vitesse angulaire. Clairaut s'attaque ensuite au cas d'une planète recouverte d'un liquide homogène, ne différant que peu de la sphère et composée de différentes couches solides, homogènes, séparées par des surfaces de même centre et dont la densité varie d'une couche à l'autre suivant une loi quelconque. Il examinera plus tard le cas d'une planète fluide, séparée en couches remplissant les mêmes conditions. Il montre, dans ces deux cas, qu'une figure d'équilibre peut être un ellipsoïde et il donne l'équation aux dérivées partielles qui fournit la variation d'ellipticité des diverses couches en fonction de la loi de variation de la densité. C'est à Clairaut que l'on doit la définition des *surfaces de niveau*, surfaces telles que la verticale leur soit perpendiculaire en chaque point. Ce sont donc, comme nous l'avons vu, des équipotentielles pour la pesanteur terrestre.

Puis c'est au tour de Colin Maclaurin (Kilmodan, février 1698 - Édimbourg, 14 juin 1746), celui de la formule du développement en série familière à tous les mathématiciens, d'établir la relation entre excentricité et vitesse de rotation dans le cas d'une masse homogène. En 1743, Thomas Simpson (Market Bosworth, Leicestershire, 20 août

1710 - Market Bosworth, 14 mai 1761), bien connu des étudiants d'analyse numérique pour sa méthode de calcul approché d'une intégrale définie, montre que, pour une vitesse donnée, il existe deux ellipsoïdes de révolution qui sont des figures d'équilibre ; mais Jean Le Rond d'Alembert (Paris, 16 novembre 1717 - Paris, 20 octobre 1783), le fondateur de *L'Encyclopédie* avec Denis Diderot (Langres, 5 octobre 1713 - Paris, 31 juillet 1784), démontrera, en 1765, que l'un des deux ellipsoïdes est instable. Dès 1749, d'Alembert avait étudié, dans ses *Recherches sur la précession des équinoxes et la nutation de l'axe de la Terre dans le système newtonien*, les actions exercées par le Soleil et la Lune sur la Terre. Il considérait celle-ci comme une sphère entourée d'un ménisque qui s'épaississait de plus en plus en allant des pôles vers l'équateur. Il ramenait ainsi cette étude à celle d'un solide soumis à des forces connues, ce qui lui permettait d'en déduire la précession et la nutation. On pouvait alors calculer l'aplatissement à partir des observations de ces deux phénomènes. La valeur obtenue dépendait de la variation de la densité depuis la surface jusqu'au centre de la Terre. Puis, dans ses *Recherches sur le système du Monde*, publiées en 1754 et 1756, d'Alembert s'attaqua à l'étude de l'attraction d'un sphéroïde voisin de la sphère, formé de couches de densités différentes, dont l'équation est algébrique d'ordre quelconque.

Adrien Marie Legendre montre en 1784 que l'ellipsoïde est l'unique figure d'équilibre d'une masse fluide homogène tournant autour d'un axe si l'on suppose que sa surface extérieure est peu différente d'une sphère. Sa démonstration suppose que la surface libre du fluide est de révolution, une hypothèse que Pierre-Simon de Laplace (Beaumont-en-Auge, 23 mars 1749 - Paris, 5 mars 1827) n'avait pas faite dans son travail de 1782 où il se limitait au terme du premier ordre par rapport à l'aplatissement. Puis Laplace prouvera, en 1799, qu'il n'y a pas d'autre figure d'équilibre que ces deux ellipsoïdes et qu'ils sont réels pourvu qu'une certaine condition reliant vitesse angulaire et densité soit satisfaite. En 1867, Tobias Mayer (Marbach, 17 février 1723 - Göttingen, 20 février 1762) avait observé un terme périodique dans la longitude de la Lune, mais n'avait pas pu en fournir d'explication. Laplace montrera, dans son *Traité de mécanique céleste* de 1802, que ce terme périodique est dû à l'action de la Lune sur le renflement équatorial de la Terre et qu'un terme analogue est présent dans la latitude de notre satellite. Il en déduira, par la latitude, un aplatissement de $1/304,6$ et, d'après la longitude, de $1/305,5$.

En 1834, Carl Gustav Jacob Jacobi (Potsdam, 10 décembre 1804 - Berlin, 18 février 1851) démontre qu'un ellipsoïde à trois axes inégaux peut également être une figure d'équilibre et que, si l'on se donne arbitrairement deux des axes, le troisième ainsi que la vitesse de rotation sont complètement déterminés. Puis, en 1842, C.O. Meyer, un élève de Jacobi, établit que, pour une vitesse angulaire donnée, il existe, sous une certaine condition, un troisième ellipsoïde à axes inégaux. Vers la même époque, ce problème a également retenu l'attention du mathématicien français Joseph Liouville (Saint-Omer, 24 mars 1809 - Paris, 8 septembre 1882) et du britannique James Ivory (Dundee, 17 février 1765 - Londres, 21 septembre 1842).

Un problème important était de trouver le champ de gravité d'un tel ellipsoïde ; il dérive d'un potentiel. La question suscita de nombreux travaux théoriques de Lagrange, Legendre et surtout Laplace qui montra, dans son monumental *Traité de mécanique céleste* en cinq volumes, parus entre 1799 et 1825, que ce potentiel vérifie une équation aux dérivées partielles, la célèbre équation de Laplace. On sait maintenant, qu'à l'échelle des temps géologiques, la Terre se comporte comme un fluide en rotation.

À la fin du XVIIIe siècle, la géodésie a trouvé sa place entre astronomie et mécanique céleste. À la première, elle emprunte ses instruments et ses méthodes d'observation qui permettent de déterminer latitudes, longitudes et azimuts. La seconde lui fournit les raisons mécaniques de l'aplatissement de la Terre et les méthodes pour le calculer.

Mais, conjointement à ces travaux théoriques, il fallait également déterminer les paramètres de cet ellipsoïde terrestre. Des calculs précis étaient nécessaires.

En 1805, Legendre prit en considération dans ses calculs les latitudes astronomiques intermédiaires entre Dunkerque et Montjouy. Il obtint ainsi un système linéaire avec plus d'équations que d'inconnues qu'il résolut par la *méthode des moindres carrés* et trouva un aplatissement égal à 1/334. La justification de la méthode des moindres carrés comme procédure statistique est due à Carl Friedrich Gauss en 1809, puis en 1810 dans son Mémoire sur l'astéroïde Pallas découvert par Heinrich Wilhelm Olbers (Arbergen, 11 octobre 1758 - Bremen, 2 mars 1840) le 28 mars 1802. Selon lui la méthode des moindres carrés conduit à la meilleure combinaison possible des observations quelle que soit la loi de probabilité des erreurs. Elle fut immédiatement reconnue comme une contribution majeure. Gauss affirma l'avoir en fait déjà utilisée dès

1795. Ce qui est certain, c'est qu'il s'en servit en 1801 pour déterminer l'orbite de la comète Cérès découverte par Giuseppe Piazzi (Ponte di Valtellina, 6 juillet 1746 - Naples, 22 juillet 1826) le 1er janvier 1801 depuis son observatoire situé en Sicile, un mois avant qu'elle ne disparaisse derrière le Soleil. À partir de ces quelques observations, les astronomes prédirent que la comète devait réapparaître aux alentours de septembre 1801. Cependant, malgré toutes les attentions, personne ne fut en mesure de la localiser. Gauss décida alors de s'attaquer au problème. Mais au lieu d'utiliser des procédures bien établies, il mit au point une méthode complètement nouvelle de détermination des orbites. En novembre 1801, il était capable d'effectuer en une heure les calculs qui avaient pris trois jours à Euler. Ses résultats montraient que Cérès était à plusieurs degrés de la position prédite par les autres astronomes et, le 31 décembre 1801, elle fut enfin localisée, exactement où Gauss l'avait calculé. C'est cet événement qui, plus que tout autre de ses célèbres travaux mathématiques (dont ses *Disquisitiones aritheticae* publiés la même année), établit la réputation internationale de Gauss. Cependant, perfectionniste, il attendra huit ans avant de publier sa méthode dans sa *Theoria motus*. Cet ouvrage contient un ensemble étendu de procédures pour déterminer l'orbite complète d'un objet céleste à partir de trois ou quatre observations et se termine par sa méthode des moindres carrés. Nous aurons l'occasion d'en reparler.

Après Legendre, les calculs furent repris par Delambre en 1810, puis par Henric Johan Walbeck (Abo, Suède, 11 octobre 1793 - Abo, 23 octobre 1822) en 1819 qui, en traitant les données provenant de l'arc du Pérou, des deux arcs indiens, des arcs français et anglais et de celui de Laponie et en négligeant les latitudes intermédiaires, obtint un aplatissement $\alpha = 1/302,76$. En 1841, Friedrich Wilhelm Bessel (Minden, 22 juillet 1784 - Königsberg, 17 mars 1846) obtient $\alpha = 1/(299,153 \pm 4,667)$, $a = 6.377.387$ m et une longueur du quart du méridien égale à $M/4 = 10.000.856$ m. En 1848, George Biddell Airy trouva $\alpha = 1/299,325$. En 1859, Theodor Friedrich von Schubert (Saint-Pétersbourg, 1779 - 1865), fils de l'astronome Theodor Friedrich von Schubert (Helmstädt, 1758 - 1825), effectua des calculs en supposant un ellipsoïde avec trois axes inégaux. Le géodésien britannique Alexander Ross Clarke (Reading, 16 décembre 1828 - Reigate, Surrey, 11 février 1914), après un premier calcul avec une section méridienne non elliptique en 1866, revint au cas d'un ellipsoïde (dit de Clarke) avec $\alpha = 1/293,465$, $a = 6.378.180$ m et $M/4 = 10.001.871$ m. Ce furent les valeurs adoptées à cette époque

par le Service géographique de l'armée. Elles avaient été obtenues par la méthode des moindres carrés qui permet de minimiser les erreurs accidentelles de mesure. Cependant, Clarke reconnut que les données étaient insuffisantes pour résoudre définitivement le problème. Enfin, en 1874, Emanuele Fergola (Naples, 20 octobre 1830 - Naples, 5 avril 1915) fit l'hypothèse d'un ellipsoïde de révolution dont l'axe n'était pas confondu avec celui des pôles. Mais les incertitudes sur la position de l'axe de révolution étaient telles que cette hypothèse ne conduisit à aucune conclusion intéressante. À la fin du XIXe siècle, il faut mentionner les travaux du général François Perrier (Valleraugue, Gard, 18 avril 1833 - Montpellier, 20 février 1888) en France, d'O. Schreiber en Prusse, d'Alberto Ferrero della Marmora (Turin, 7 avril 1789 - Turin, 18 mars 1863) qui dresse une carte de la Sardaigne, de G.C.G. von Zachariae au Danemark, de Carl von Orff (1828 - 1905), le grand-père du compositeur Carl Orff (Munich, 10 juillet 1895 - Munich, 29 mars 1982), en Bavière et de Carlos Ibáñez de Ibero, marqués de Mulhacén, (Barcelone, 1825 - Nice, 1891) en Espagne, qui fut le co-fondateur et le premier président de l'Association internationale de géodésie en 1864.

Les écarts que présentent les divers résultats obtenus s'expliquent par les erreurs possibles dans les observations géodésiques et astronomiques. La Terre n'est pas un ellipsoïde de révolution parfait. Selon les arcs choisis pour les calculs, on arrive à des résultats différents. Les écarts observés sont une manifestation de la déviation de la verticale.

Le système métrique décimal

Revenons maintenant à la chronologie stricte.

L'idée du système métrique, destiné à unifier les mesures, à faire cesser l'*étonnante et scandaleuse diversité* des poids et mesures, fut présentée par Talleyrand (1754 - 1838) à l'Assemblée constituante en 1790. Il fallait décider de rattacher l'unité de longueur soit à la longueur d'un pendule simple dont la période était d'une seconde soit à une fraction du méridien. Mais la première solution faisait dépendre une longueur du temps, une autre unité de mesure. L'abbé Gabriel Mouton (Lyon, 1618 - Lyon, 28 septembre 1694) avait suggéré en 1670 d'adopter comme unité de longueur la *virga*, millième partie de l'arc du méridien correspondant à une minute et Talleyrand reprit son idée. La Convention nationale décida de déterminer la longueur exacte du méridien terrestre. Le mètre étalon, celui du fameux pavillon de Breteuil à Sèvres, serait la

dix-millionième partie du quart du méridien. Afin que cette définition puisse être acceptée sans discussion par l'ensemble des nations (une ambition internationale de la France), il fallait donc mesurer de nouveau le méridien avec toute la précision voulue. Ce fut possible grâce aux progrès des instruments scientifiques.

Le travail fut confié à Jean Baptiste Joseph Delambre et Pierre Méchain et fut réalisé entre 1792 et 1798.

Pierre François André Méchain était né à Laon, le 16 août 1744. Il avait découvert douze comètes et avait démontré qu'Uranus, découverte en 1781 par William Herschel (Hanovre, 15 novembre 1738 - Slough, Buckinghamshire, 25 août 1822), était une planète. Il était membre de l'Académie des sciences depuis 1782. Méchain devait prolonger le méridien jusqu'à Barcelone. Le voyage jusqu'aux Pyrénées n'est pas facile. Ses instruments sont suspects aux yeux des comités révolutionnaires locaux. Sa triangulation est presque achevée quand l'Espagne et la France entrent en guerre. Il continue cependant ses mesures et les répète même plusieurs fois. Emprisonné, puis autorisé à se rendre en Italie, Méchain s'établit à Gênes jusqu'en 1795. Il croit ne pas avoir réussi à refermer exactement sa triangulation : il y a un écart de 3 secondes d'angle entre les latitudes calculées pour un même point de Barcelone, selon que l'on s'appuie sur ce point ou sur la station de Monjuich, distante de deux kilomètres. Méchain recommence vainement ses calculs, refuse à son retour en France de communiquer ses dossiers afin que personne ne puisse s'apercevoir de son erreur. Il montre un caractère assombri et anxieux, puis obtient (difficilement) une nouvelle mission sous le prétexte de prolonger le méridien jusqu'aux Baléares.

Entre-temps, le 7 avril 1795 (18 germinal, an III), la Convention nationale avait adopté le système métrique décimal et défini le mètre et le kilogramme. La définition du mètre était basée sur les mesures de Delambre et Méchain du méridien. Pour la base, on avait disposé, sur la route de Meulun à Lieusaint des madriers dressés sur lesquels on avait placé des règles bi-métalliques platine/laiton conçues par Jean Charles Borda. Pour éviter les déplacements que des chocs auraient pu engendrer, les règles n'étaient pas mises exactement bout à bout, mais chacune d'elles pouvait glisser dans une coulisse et un vernier permettait d'évaluer avec précision les intervalles qui les séparaient. On trouva 6075,90 toises, soit environ 11.842 m. Comme vérification, une autre base fut mesurée près de Perpignan. Après calcul des triangles, la différence entre la valeur me-

surée et celle calculée n'était que de 30 cm environ. Les angles avaient été obtenus à l'aide du théodolite à répétition de l'ingénieur Étienne Lenoir (Mer, Loir-et-Cher, 1er mars 1744 - Paris, 1832). Delambre et Méchain avaient trouvé 551.584,7 toises, alors que la référence internationale de 1980, mesurée par des moyens beaucoup plus sophistiqués, est de 551.589,3 toises, soit une erreur de 10 m sur 1.000 km ! Il en résulte que le véritable mètre est plus court que sa définition actuelle. Le mètre eut beaucoup de mal à s'imposer. Cela ne doit pas nous étonner après le passage des anciens Francs aux nouveaux puis à l'Euro ! Napoléon supprimera même son usage. Il fut ensuite rétabli mais, dans un ouvrage de cosmographie de 1887 destiné aux candidats au Baccalauréat ès sciences, les distances sont encore exprimées en lieues et en toises !

Méchain repart le 26 avril 1803, mais succombe à la fièvre jaune et à l'épuisement le 20 septembre 1804, à Castellón de la Plana au nord de Valence. L'écart de 3 secondes, qu'il n'avait pu ni expliquer ni combler, était dû au cumul de petits effets : erreurs instrumentales, déviations locales de la verticale, réfraction imprécise des étoiles basses. Il n'avait commis aucune erreur.

François Arago

Après le décès de Méchain, son fils, qui est secrétaire de l'Observatoire, démissionne et la place est offerte à un jeune polytechnicien de la promotion 1803 qui deviendra célèbre, François Dominique Jean Arago (Estagel, 26 février 1786 - Paris, 2 octobre 1853). Mais celui-ci ne veut pas renoncer à une carrière militaire qui l'attire et dans laquelle il est assuré de la protection du maréchal Lannes (1769 - 1809), ami de son père. Cependant, après une visite que lui font Pierre Simon de Laplace et son collègue Siméon Denis Poisson (Pithiviers, 21 juin 1781 - Paris, 25 avril 1840), il accepte à titre temporaire avec la promesse de pouvoir réintégrer l'artillerie s'il le désire. Pour une fois, Laplace fut prévenant, ce qui ne semble pas avoir été dans ses habitudes.

À l'Observatoire, Arago devient le collaborateur de Jean-Baptiste Biot (Paris, 21 avril 1774 - Paris, 3 février 1862) et ils se livrent ensemble à des expériences sur la diffraction dans les gaz, ils déterminent des tables de réfraction atmosphérique et calculent le rapport entre le poids de l'air et celui du mercure. Mais leur idée principale est de continuer la mesure du méridien terrestre interrompue par la mort de Méchain. Laplace soutient leur projet et obtient les fonds nécessaires.

L'expédition scientifique se transforma en véritable épopée. Ils partent de Paris au début de l'année 1806 accompagnés du commissaire espagnol Rodriguez et de Chaix. Ils visitent les stations établies par Méchain et apportent quelques modifications à la triangulation. Fin novembre, Arago, seul, s'installe au Desierto de las Palmas près de Valence, en Espagne. La lumière du signal de Campvey, sur l'île d'Ibiza, ne se voit que très rarement. Arago attend

> *On concevra facilement quel ennui devait éprouver un astronome actif et jeune, confiné sur un pic élevé, n'ayant pour promenade qu'un espace d'une vingtaine de mètres carrés, et pour distraction que la conversation de deux chartreux dont le couvent était situé au pied de la montagne, et qui venaient en cachette enfreindre la règle de leur ordre.*

Début octobre 1806, Monsieur Lanusse, le consul de France, les avertit, tout effaré, que l'Espagne a déclaré la guerre à la France. Ils ne sont plus en sécurité, il faut se préparer à partir et à embarquer, dans quelques jours, sur un bâtiment américain qui doit venir s'ancrer à Valence. Mais l'ardeur belliqueuse, suscitée par la fausse nouvelle d'un désastre français en Prusse, se calme après l'annonce de la victoire d'Iéna, le 14 octobre 1806 et l'on fait semblant que la proclamation espagnole était dirigée contre le Portugal. Arago doit attendre l'arrivée de Biot à Valence. Les aventures se succèdent.

Il faut lire le récit, sans doute quelque peu outré, mais extrêmement vivant et coloré, qu'Arago en a lui-même donné. Il fourmille de détails et d'anecdotes qui nous montrent son sens de l'humour et, sans doute aussi, de la dérision. Un jour, invité à prendre le thé par la fille d'un Français résidant à Valence, il doit subir la jalousie de son fiancé. Une autre fois, devant établir une station dans la montagne, il doit requérir la protection de la garde nationale et faire face à des brigands. Un homme vient frapper à la porte de sa cabane, il se dit garde de la douane. Arago lui donne asile avant de découvrir qu'il s'agit du chef des voleurs de grands chemins de la région. Pour transporter ses instruments, il ne peut faire appel, à la fois, aux Aragonais, aux Valenciennois et aux Catalans qui se détestent. Arago et Biot se retrouvent à Valence. Biot rentre à Paris et Arago en profite pour joindre *géodésiquement l'île Mayorque à Ibiza et à Formentera, obtenant ainsi, à l'aide d'un seul triangle, la mesure d'un arc de parallèle de un degré et demi.*

Arago se rend à Majorque pour y mesurer la latitude et l'azimut. Il s'établit sur le Clop de Galazo, une montagne qui surplombe le port de Palma. Le bruit se répand qu'Arago est là pour faire des signaux à l'armée française afin de favoriser son arrivée. Ces rumeurs deviennent de plus en plus menaçantes pour Arago lorsqu'arrive, le 27 mai 1808, Berthemie, un officier d'ordonnance de Napoléon. Arago veut se réfugier sur le petit bateau que le gouvernement espagnol met à sa disposition et dont le patron est un certain Damian. Il se déguise. Ceux qui le cherche ne le reconnaissent pas car il parle parfaitement le majorquin et les dirige vres une fausse piste. Mais devant le peu d'empressement et de coopération du capitaine du bateau, don Manuel de Vacaro, et craignant pour sa vie, il demande à être incarcéré au château de Belver. Après avoir échappé de justesse à la foule et avoir même reçu un léger coup de poignard à la cuisse, il arrive à Belver où

> *Le gouverneur de Belver était un personnage très-extraordinaire. S'il vit encore, il pourra me demander un certificat de priorité sur les hydropathes modernes : le capitaine grenadin soutenait que l'eau pure, administrée convenablement, était un moyen de traiter toutes les maladies, mêmes les amputations.*

Ayant lu, dans l'un des journaux que lui apporte régulièrement son compagnon Rodriguez, le récit de sa propre exécution, il décide de s'évader, préférant périr noyé que pendu. Rodriguez se met immédiatement à l'œuvre et va voir les autorités. Ne pouvant prévoir l'issue du soulèvement, le capitaine-général Vivès préfère donner son accord à l'évasion, tout en dégageant sa responsabilité. Arago s'enfuit le 28 juillet 1808. Damian l'attend sur la plage avec une embarcation dans laquelle il a réuni les instruments de valeur de la station géodésique du Clop.

Le lendemain, Arago et Berthemie font voile vers Alger où ils arrivent le 3 août 1808. Le débarquement s'agrémente bien de quelques péripéties supplémentaires, mais les fugitifs finissent pas être reçus par le consul de France, Dubois-Thainville, qui leur procure de faux passeports et s'occupe de leur trouver des places sur un bâtiment qui doit appareiller pour Marseille le 13 août. Au moment du départ, le capitaine voit que le Bey est sur sa terrasse à l'observer. Il craint une punition s'il tarde à mettre la voile et complète alors son équipage en enrôlant à la hâte, et sans même leur laisser le temps de prévenir leur famille, des curieux qui ne sont même pas marins. Il est important, pour la suite du récit, de

mentionner que deux lions que le Dey d'Alger envoie à Napoléon sont du voyage.

En face de Cagliari, ils commencent par rencontrer un bâtiment américain dont le capitaine leur cause quelques soucis. Cependant tout se passe bien jusqu'au moment où, le 16 août, alors qu'ils approchent de Marseille, ils sont faits prisonniers par un corsaire espagnol de Palamos armé de deux canons. Arago reconnaît, parmi l'équipage, l'un des matelots de Manuel de Vacaro, le capitaine de Palma de Majorque qui lui avait causé tant de problèmes, et qui avait été son domestique. Son faux passeport devenu inutile, Arago reste caché, la tête enveloppée d'une couverture, jusqu'à Rosas où ils sont débarqués. Arago est interrogé par un juge qui ne réussit pas à découvrir sa véritable nationalité ni son identité, Arago ayant même été jusqu'à entonner, dans le dialecte d'Ibiza, un air chanté par tous les bergers de l'île pour brouiller les pistes. Voyant qu'il ne s'est pas laissé intimider, les Arabes, les Marocains et les Juifs qui ont assisté à la scène, lui demandent de les aider dans leurs réclamations auprès du gouvernement espagnol. Puis il se fait passer pour un marchand ambulant de Schwekat en Hongrie.

Après quelques épisodes supplémentaires, qui leur ont même fait craindre pour leurs vies, Arago et Berthemie sont conduits à la forteresse de Rosas. Puis la ville de Rosas tombe aux mains des Français. Les prisonniers sont transférés dans un fort de la Trinité le 25 septembre 1808, puis à Palamos le 17 octobre. On les laisse aller à terre quelques heures par jour et Arago fait ainsi la connaissance de la duchesse d'Orléans, mère de Louis-Philippe, qui a quitté sa résidence de Figueras bombardée. Des juges viennent de Girone pour interroger les prisonniers. Quelle ne fut pas leur surprise quand, le lendemain, on leur annonce qu'ils sont libres. C'est grâce aux lions. En effet, quelque temps auparavant, Arago avait écrit au Dey d'Alger pour l'informer de l'arraisonnement illégal de son bateau et de la mort de l'un des lions destinés à l'Empereur. Le Dey est furieux. Il convoque sur le champ le consul d'Espagne, demande des dédommagements financiers pour son lion et menace d'une guerre si on ne lui rend pas son bâtiment sur-le-champ. Les Espagnols cèdent et relâchent même leurs prisonniers.

Le 28 novembre 1808, ils mettent de nouveau le cap sur Marseille. Mais un coup de mistral d'une extrême violence les déroute et ils se retrouvent, le 5 décembre, à Bougie en Algérie. Arago et Berthemie veulent se rendre à Alger par mer, mais on ne leur en donne pas l'autorisation à cause des dangers que cela représente. Les deux Français

se déguisent et partent à pied sous la conduite de plusieurs matelots maures de l'équipage. Ils arrivent à Alger, après, bien entendu, quelques autres aventures pour pimenter le trajet, le 25 décembre 1808.

Entre-temps, le Dey a été décapité. Son successeur, un ancien « épileur de corps morts », est étranglé avant même d'être intronisé. Arago et Berthemie restent plusieurs mois à Alger. Le nouveau Dey leur réclame une somme énorme pour les laisser partir. Après de nombreuses tractations et des aventures rocambolesques, ils s'embarquent finalement pour la France le 21 juin 1809 et arrivent à Marseille le 2 juillet. Ils sont mis en quarantaine au lazaret de Marseille. C'est là qu'Arago reçoit la première lettre d'Alexander von Humboldt (Berlin, 14 septembre 1769 - Postdam, 6 mai 1859), le célèbre voyageur et naturaliste allemand, dans laquelle, sans le connaître, il lui offre son amitié. Les deux hommes resteront liés jusqu'au décès d'Arago en 1853. Après le temps réglementaire au lazaret et un passage à Perpignan pour saluer sa famille, Arago rejoint Paris au terme d'une expédition qui aura duré trois ans. Il dépose au Bureau des longitudes et à l'Académie des sciences le résultat de ses observations qu'il avait malgré tout réussi à conserver. C'est un héros. Des plaques, apposées sur les trottoirs de Paris le long du méridien sont d'ailleurs là pour rendre hommage à ce travail.

Le roman de Jules Verne *Aventures de trois Russes et de trois Anglais*, publié en 1872, raconte l'histoire de six astronomes chargés de mesurer une partie du méridien terrestre en Afrique du Sud. En pleine guerre de Crimée, ces astronomes s'allient, car il ne faut pas laisser à la France le monopole de la détermination des mesures étalons. L'un des membres de l'expédition n'est autre qu'un certain colonel Everest (pas le véritable). Il n'est pas question de résumer ici ce roman, mais disons simplement qu'il a été considéré comme un hommage à Arago, car les héros de Jules Verne utilisent la méthode de triangulation qu'Arago avait décrite dans sa célèbre *Astronomie Populaire*. Jules Verne se réfère également aux méthodes de géodésie exposées dans les *Leçons nouvelles de cosmographie* (1854) de son cousin, Paul Henri Garcet (1815 - décédé en 1871 des suites des privations endurées pendant le siège de Paris), professeur de classes préparatoires au lycée Henri IV à Paris et collaborateur du mathématicien Joseph Bertrand (Paris, 11 mars 1822 - Paris, 3 avril 1900). Il en reproduit même une figure et un paragraphe entier. L'épisode de la prison de Belver est brièvement évoqué dans un autre roman de Jules Verne, *Clovis Dardentor* (1896), où des excursionnistes visitent ce château. Dans *Hector Servadac* (1877), on retrouve également l'astro-

nome Palmyrin Rosette à Formentera, où il voulait vérifier les mesures d'Arago ! Un monument à Jules Verne a d'ailleurs été érigé à Formentera en 1975, sur le sommet de La Mola d'où Arago avait effectué ses mesures. (voir Biblio : Crovisier).

Une fois les mesures terminées, une commission fut chargée d'effectuer les calculs. Le résultat parut mettre en évidence un remarquable accord entre la longueur du méridien et le mètre-étalon des Archives. Mais deux erreurs, de sens contraires et qui se compensaient à peu près, s'étaient glissées dans les opérations numériques. Louis Puissant (Le Châtelet-en-Brie, 22 septembre 1769 - Paris, 10 janvier 1843) fut le premier à s'en apercevoir. Il annonça que la distance entre Montjouy et Formentera était trop courte de 69 toises. Pour trancher la question, le Bureau des longitudes nomma une commission composée de Pierre Daussy (Paris, 8 octobre 1792 - Paris, 5 septembre 1860), Claude Louis Mathieu (Mâcon, 25 novembre 1783 - Paris, 5 mars 1875), beau-frère d'Arago, et Charles-Louis Largeteau (Mouilleron-en-Pareds, 23 juillet 1791 - Pouzauges, 11 septembre 1857) qui rédigea le rapport. Il fut d'abord établi que la méthode de Delambre, suivie par les calculateurs de 1808 et fondée sur le parallélisme des méridiens, introduisait une erreur de 100 toises en trop ; en outre, les mêmes calculateurs avaient confondu la distance de Dunkerque au parallèle de Formentera avec la distance du même point à la perpendiculaire abaissée de Formentera sur le méridien de Dunkerque, d'où une autre erreur, cette fois de 169,88 toises en moins. L'arc de méridien se trouvait donc trop petit de 70 toises environ. Dès lors, le méridien ne contenait pas exactement 40 millions de mètres, mais on conserva cependant la valeur du mètre fixée par l'étalon des Archives.

Après la Méridienne

À cette époque, la France était manifestement en tête des nations pour les progrès de la géodésie. De nombreux officiers géographes étaient au service de l'armée napoléonienne. Ils avaient établi des cartes des régions parcourues. Citons parmi eux Henry (?), Jean Baptiste Mathurin Brousseaud (Limoges, 8 novembre 1776 - Limoges, 16 novembre 1840) qui participa aux campagnes de l'Empire comme ingénieur géographe, François-Joseph Delcros (Florence, 17 juillet 1777 - 1865), capitaine au Corps royal des ingénieurs-géographes qui travailla à l'élaboration de la carte de France jusqu'en 1834 puis, sa vue baissant, obtint une pension

le 10 avril 1835 comme chef d'escadron d'État-Major, et Jean-Baptiste Coraboeuf (Nantes, 22 avril 1777 - 1859), un membre de l'expédition d'Égypte. Les instruments avaient été perfectionnés.

Sous l'impulsion de Louis Puissant la carte d'État-Major au 1/80.000e fut dressée. Orphelin, très pauvre, il avait été placé chez un notaire dès l'âge de treize ans. Il fut remarqué par un jeune ingénieur des Ponts et chaussées d'Agen, Antoine François Lomet (Château-Thierry, 6 novembre 1759 - Paris, 10 novembre 1826), qui jouera un rôle important pendant la Révolution et deviendra baron d'Empire, et lui donnera une instruction. Puissant entra au Dépôt de la guerre en 1790. Cette institution, créée en 1688, avait été initialement chargée de la recherche et de la conservation des archives militaires. Le corps des Ingénieurs des camps et armées fut créé en 1696 et lui fut affecté. En 1726, ces ingénieurs devinrent les Ingénieurs géographes des camps et armées. Pendant la campagne d'Espagne de 1794, Puissant se fit remarquer par son habileté pour le dessin topographique. Rentré à Paris après le traité de Bâle (22 juillet 1795), il suivit les cours de Lagrange et de Laplace. Après un séjour comme professeur à Agen, il revint au Dépôt de la guerre et procéda à une triangulation de l'île d'Elbe. Puis il participa à celle de la Lombardie en 1803-1804. Son *Traité de géodésie* parut en 1805. Il fut nommé professeur au Dépôt de la guerre et de nombreuses promotions d'ingénieurs géographes suivirent ses cours. En 1828, il fut élu à l'Académie des sciences au fauteuil de Laplace, son protecteur. Puissant avait été le premier à élever la géodésie en un corps de doctrine.

L'exemple français allait être suivi par de nombreux pays comme le rapporte Delambre en 1810. Les travaux de triangulation commencent en Angleterre au XVIIIe siècle avec le général William Roy (Miltonhead, South Lanakshire, 4 mai 1726 - Londres, 1er juillet 1790). Ses mesures s'étendent de l'île de Wight jusqu'aux Shetlands. En Suède, Svanberg reprend les mesures de Maupertuis et les prolonge au nord et au sud. En 1787, Jean-Dominique Cassini, le fils de César-François Cassini de Thury, propose de relier géodésiquement les observatoires de Paris et de Greenwich. Ce fut fait de 1787 à 1790. Le travail fut continué par William Mudge (Plymouth, 1er décembre 1762 - Londres, 17 avril 1820) et H. James. Aux Indes, William Lambton (Grosby Grange, Yorkshire, 1756 - Hinjunghat, Inde, 19 janvier 1823) et George Everest (Gwernvale, Brecknockshire, 4 juillet 1790 - Londres, 1er décembre 1866) entreprennent la mesure d'un arc de 21° allant du cap Comorin, tout au sud du pays, à l'Himalaya ; cela dure de 1800 à 1842. En Prusse, les premières mesures

datent de 1805. En 1818, Gauss se tourne vers la géodésie à la demande de l'astronome et géodésien allemand Heinrich Christian Schumacher (Bramstedt, Holstein, 3 septembre 1780 - Altona, 28 décembre 1850). Il y consacrera huit ans. Il devient conseiller des gouvernements du Hanovre et du Danemark et est chargé de réaliser un relevé du Hanovre par triangulation. Il invente l'héliotrope, un appareil qui réfléchit les rayons du Soleil dans une direction bien déterminée et permet un alignement très précis des instruments de mesure sur de longues distances. Il effectue ainsi la mesure de l'arc entre Göttingen et Altona. La mesure de l'arc de la Prusse orientale et la triangulation côtière sont effectuées en 1838 par Friedrich Wilhelm Bessel et son élève Johann Jakob von Baeyer (Müggelsheim-bei-Köpernik, 5 novembre 1794 - Berlin, 10 septembre 1885). Ils utilisent la méthode des directions de Friedrich Georg Wilhelm von Struve (Altona, 15 avril 1793 - Saint-Pétersbourg, 23 novembre 1864) et un appareil dû à Bessel pour mesurer la longueur de la base.

Arrêtons-nous un peu sur Baeyer et sur la famille Struve. Baeyer est le fils de modestes paysans. Il s'engage dans l'armée en 1813 et est promu officier deux ans plus tard. En 1821, il est affecté à la Section trigonométrique de l'État-Major prussien. Il participe à de nombreuses expéditions et, en 1835, il est placé à la tête de cette Section. Après la mort de Bessel en 1846, il devient le maître incontesté des géodésiens allemands. Il prend sa retraite en 1857. Mais sa carrière se prolonge encore vingt-huit ans pendant lesquels il va mettre toute son énergie à la création d'associations scientifiques internationales. À partir de 1870, il dirige l'Institut géodésique de Berlin et est l'artisan du système européen de mesures géodésiques. Il meurt à quatre-vingt-onze ans, laissant son pays dans les premiers rangs de la géodésie mondiale. Son fils Johann Friedrich Wilhelm Adolf (Berlin, 31 octobre 1835 - Starnberg, 20 août 1917) obtiendra le prix Nobel de chimie en 1905 pour sa découverte des phtaléines en 1871 et la synthèse de l'indigo réalisée en 1883.

Friedrich Georg Wilhelm von Struve, dont nous avons déjà parlé, est le second d'une lignée de cinq générations d'astronomes. Il fonde l'observatoire de Pulkovo, inauguré en 1839 près de Saint-Pétersbourg, et en est le premier directeur. Il est le fils de Jacob Struve (1755 - 1841) et le père de Otto Wilhelm von Struve (1819 - 1905) qui lui succède à la tête de l'observatoire de Pulkovo. Otto Wilhelm eut deux fils, Gustav Wilhelm Ludwig (1858 - 1920) et Karl Hermann Struve (1870 - 1944), tous deux astronomes. Le fils de Ludwig, Otto (1897 - 1963), émigra

aux États-Unis après la première guerre mondiale et devint directeur de l'observatoire de Yerkes situé à Williams Bay dans le Wisconsin. Le fils de Hermann, Georg Otto Herman (1886 - 1933), aura un fils, Wilfried (1914 - 1992), qui obtiendra un doctorat en astronomie mais fera carrière comme ingénieur du son.

En Russie, le français Joseph Nicolas Delisle (Paris, 4 avril 1688 - Paris, 11 septembre 1768) avait été appelé par Pierre le Grand dès 1726 et un cours de géodésie fut dispensé sous l'égide de l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg. Un *Atlas de l'Empire russe* fut commencé par Ivan Kirilovich Kirilov (1689 - 1737) à partir des cartes des différentes provinces. Le premier atlas de l'Empire parut en 1745 sous la direction du mathématicien suisse Leonhard Euler (Bâle, 15 avril 1707 - Saint-Pétersbourg, 18 septembre 1783). Puis Friedrich Georg Wilhelm von Struve entreprit la mesure d'un arc de $25°20'$ allant du Danube à la mer Baltique. Les travaux durèrent de 1816 à 1850. Au Danemark, Heinrich Christian Schumacher et Carl Christopher Georg Andrae (Île de Moen, Danemark, 1812 - 1893), capitaine d'État-Major et professeur de géodésie à l'École militaire de Copenhague, doivent être mentionnés pour leur mesure de l'arc de méridien entre Skagen et Lauenburg en 1867.

Il était également nécessaire de mesurer des arcs de parallèles. En 1811, Laplace est à l'origine d'une chaîne de triangles allant de Marennes jusqu'à Fiume, en Italie. Les travaux sont interrompus en 1813-1814. L'ingénieur Brousseaud, aidé de Charles-Louis Largeteau, Plana et Carlini, couvre, de 1817 à 1820, l'espace entre le méridien de Paris et l'océan. Enfin, en 1821 et 1822, une mission austro-sarde comble la triangulation entre les Alpes françaises et Turin, travail difficile à cause du relief et des différences de longitudes. Le parallèle de Paris, depuis Brest jusqu'à Strasbourg, est mesuré entre 1818 et 1823. On le raccorde avec les triangles qui avaient été tracés de Strasbourg à Munich en 1801. Le parallèle fut prolongé jusqu'à Vienne, puis Budapest, entre 1826 et 1830. L'arc du cinquante-deuxième parallèle fut mesuré, à l'initiative de Friedrich Georg Wilhelm von Struve en 1857, de l'île de Valencia en Irlande jusqu'à Orsk dans l'Oural avec une amplitude totale de plus de soixante-huit degrés. Les capitaines François Perrier et Versigny s'occupèrent, de 1860 à 1868, du parallèle algérien qui fut ensuite prolongé en Tunisie jusqu'au cap Bon en 1884-1885. Les Italiens avaient déjà rattaché les futures stations situées à l'est de cet arc à leur réseau en Sicile en 1876-1877.

On constata que la longueur d'un arc de méridien ne pouvait pas se représenter par une variation de la pesanteur en rapport avec le carré du sinus de la latitude. Aussi, le gouvernement britannique se décida-t-il, sur l'avis de Davies Gilbert, né Davies Giddy (St. Erth, 6 mars 1767 - 24 décembre 1839), vice-président de la *Royal Society*, à organiser une expédition sous la direction d'Edward Sabine (Dublin, 14 octobre 1788 - East Sheen, Surrey, 26 juin 1883) qui avait accompagné, en qualité d'astronome, le capitaine William Edward Parry (Bath, 19 décembre 1790 - Bad Ems, 8 ou 9 juillet 1855) dans sa découverte du pôle Nord. En 1822 et 1823, cette expédition longea les côtes occidentales de l'Afrique, depuis la Sierra Leone jusqu'à l'île Saint-Thomas, puis elle remonta par l'île de l'Ascension vers les côtes de l'Amérique du Sud, depuis Bahia jusqu'à l'embouchure de l'Orénoque, et poussa jusqu'au Spitzberg et une partie du Gröenland oriental qui n'avait jamais encore été exploré. En 1826, Biot poursuivit ses anciennes mesures de Formentera jusqu'à l'île d'Unst, la plus septentrionale des îles Shetland. Ses résultats, combinés à ceux de Sabine, montrèrent que l'aplatissement n'était pas le même de l'équateur au 45e parallèle ou du 45e parallèle au pôle. Ils mettaient aussi en évidence l'influence sur la pesanteur des roches les plus denses, comme le basalte, par opposition aux roches plus légères et aux terrains stratifiés et l'accroissement de la pesanteur dans les régions volcaniques. Des variations de la pesanteur furent également observées dans l'hémisphère Sud lors de l'expédition de Lacaille au cap de Bonne-Espérance et le voyage autour du Globe du navigateur espagnol d'origine italienne Alessandro Malaspina (Mulazzo, 5 novembre 1754 - Pontremoli, 9 avril 1810), de septembre 1786 à mai 1788. Ces variations ne paraissaient pas suivre les mêmes lois selon le méridien considéré. Selon Humboldt, le pendule, *espèce de sonde jetée dans les couches invisibles de la Terre*, fournissait des résultats moins fiables que les mesures topographiques ou astronomiques.

Des anomalies restaient donc à expliquer et l'on s'aperçut rapidement que les données disponibles étaient insuffisantes pour résoudre définitivement les problèmes posés par la géodésie. II était nécessaire d'étendre le réseau des triangulations à la Terre entière. L'*Association géodésique internationale* fut fondée à Berlin en 1864. Il fallait non seulement mesurer la longueur des arcs méridiens à différentes latitudes, mais aussi mesurer les arcs de parallèles. On avait également remarqué qu'en certains endroits le fil à plomb était dévié de la position qu'il devrait occuper si la Terre avait été un corps homogène et que cette déviation n'était pas

toujours le fait des masses montagneuses. Ce constat conduisit à se demander si les anomalies constatées ne seraient pas dues à des dépôts en ces endroits de métaux plus denses que la Terre ou à de grandes cavités. Les préoccupations de la géodésie rejoignaient celles de la géologie.

Dans un mémoire lu à l'Académie des sciences, Louis Puissant, qui dominait alors la géodésie française, avait déclaré en 1836 que Delambre et Méchain avaient commis une erreur dans la mesure de la Méridienne. L'Observatoire de Paris fut ainsi conduit à déléguer l'astronome et mathématicien Antoine François Joseph Yvon-Villarceau, de 1861 à 1866, pour vérifier les opérations géodésiques en huit points de la Méridienne de France, au moyen de déterminations astronomiques de longitudes, de latitudes et d'azimuts. Quelques-unes des erreurs dont étaient entachées les opérations de Delambre et Méchain purent alors être corrigées. En 1870, François Perrier fut chargé de reprendre la triangulation entre Dunkerque et Barcelone. Il utilisa de nouveaux instruments, construits par Émile Brunner (Paris, 11 mars 1834 - 1895), pour mesurer les angles et détermina les différences de longitudes au moyen de signaux lumineux nocturnes. De 1870 jusqu'à sa mort, il dirigea les opérations. Elles furent terminées en 1879 entre Perpignan et Melun. Perrier s'employa aussi au rattachement de l'Espagne à l'Afrique du Nord avec le général espagnol Ibañez. La Méditerranée fut franchie par un quadrilatère dont la diagonale mesurait 270 km. La triangulation du premier ordre de l'Algérie et de la Tunisie fut terminée en 1902. À la veille de la première guerre, celles de second et de troisième ordre étaient complétées. André Cholesky (Montguyon, Charente Maritime, 15 octobre 1875 - Bagneux, Aisne, 31 août 1918), dont nous parlerons plus loin, y avait pris part.

En 1899, l'Association géodésique internationale envoie dans les Andes une équipe pour reprendre les mesures du Pérou. Cette équipe, détachée du *Service géographique de l'armée* et dirigée par le général Joseph Émile Robert Bourgeois (Sainte-Marie-aux-Mines, 1857 - Paris, 10 novembre 1945) et le général Antoine François Jacques Justin Georges Perrier (Montpellier, 28 octobre 1872 - Paris, 16 février 1946), le fils du général François Perrier, y restera sept ans. Signalons que le général Bourgeois deviendra directeur du Service géographique de l'armée en 1911 et aura Cholesky sous ses ordres. C'est lui qui organisera les canevas de tir et les sections topographiques pendant la guerre et créera les sections de repérage des batteries ennemies par le son. Simultanément, une mission russo-suédoise mesure un arc de $4°10'$ au Spitzberg. Aux

États-Unis, on s'attaque à un arc de 22°. En Afrique australe, une grande triangulation de 21°, commencée en 1883 sous l'impulsion de David Gill (Aberdeen, 12 juin 1843 - 24 janvier 1914), directeur de l'observatoire de Cape Town, se poursuit.

Entre-temps, en 1906, John Fillmore Hayford (Rouse Point, New York, 19 mai 1869 - Evanston, Illinois, 10 mars 1925), calculateur au *Coast and Geodetic Survey* aux États-Unis, avait précisé le principe d'*isostasie* (du grec *isos*, égal, et *statis*, arrêt). Ce phénomène avait été mis en évidence par Pierre Bouguer lors de l'expédition du Pérou de 1736 à 1743 en se fondant sur la trop grande différence de pesanteur entre les sommets des Andes et le niveau de la mer. La densité des masses devait perturber la pesanteur et donner lieu à des déviations de la verticale. Plus tard, des calculs tenant compte de l'influence de l'Himalaya firent apparaître une correction trop forte de cette déviation. En 1855, George Biddell Airy (Alnwick, Northumberland, 27 juillet 1801 - Londres, 4 janvier 1892) et, indépendamment, John Henry Pratt (St Mary Woolnoth, Londres, 4 juin 1809 - Ghāzīpur, Inde, 28 décembre 1871) en 1856 eurent l'idée de *schémas de compensation des masses* selon lesquels la distribution des densités de l'écorce terrestre selon la profondeur serait telle que les surcroîts de masse, extérieurs au géoïde, seraient compensés par une diminution de la densité en profondeur. Dans ce modèle hydrostatique, accepté de nos jours, les continents flottent sur un magma fluide plus dense. Selon le principe d'isostasie, il existe donc un état d'équilibre isostatique entre la couche superficielle rigide de l'écorce terrestre et la couche profonde visqueuse sur laquelle elle repose. Cet équilibre est réalisé à un niveau dit *profondeur de compensation* pour lequel la pression de charge est identique en tout point. C'est, en fait, le principe d'Archimède. En utilisant les données géodésiques américaines et en décomposant la croûte terrestre en prismes, Hayford estima cette profondeur à 120 km. Il en déduisit l'ellipsoïde donnant l'écart le plus faible pour les déviations de la verticale. Son aplatissement était de 1/297, corrigé en 1917 en $1/297,3$, valeur universellement adoptée en 1924 pour un demi-siècle.

Le travail d'Hayford donnait une prépondérance au continent américain. Son travail fut repris en 1925-1934 par le finlandais Weikko Aleksanteri Heiskanen (Kangaslampi, 23 juillet 1895 - Helsinki, 21 octobre 1971) qui prit en compte de façon plus détaillée les chaînes montagneuses européennes. Il mit en lumière la présence d'une saillie du géoïde dans la région centrale de l'Europe correspondant aux Alpes et obtint une valeur

de l'aplatissement pratiquement identique à celle d'Hayford. L'isostasie est l'un des fondements de la géophysique.

Il restait à unifier les modes de représentation géodésiques. C'est ce que firent le Mexique, le Canada et les États-Unis en 1927. Mais ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que l'essentiel du travail sera accompli. Cependant, à l'heure actuelle, on n'est pas encore parvenu à une unification complète et trois ou quatre systèmes différents subsistent.

À l'opposé, la gravimétrie prit un essor extraordinaire : dans un premier temps, grâce au perfectionnement des techniques classiques, puis, à partir des années 1960, grâce aux techniques spatiales. Le champ de pesanteur terrestre est mesuré et cartographié avec une grande précision. On peut aussi étudier son évolution au fil du temps. Bien entendu, la géodésie a énormément progressé avec les satellites artificiels et l'informatique. La géodésie spatiale permet de mettre en évidence les mouvements verticaux de l'écorce terrestre aussi bien que les déplacements horizontaux des plaques tectoniques. Plusieurs branches de la science se complètent ainsi mutuellement.

Les mesures géodésiques ont maintenant atteint une très grande précision (quelques centièmes de millimètre) qui est nécessaire, par exemple, pour la surveillance des barrages hydrauliques, l'implantation de télescopes comme celui de Nancay, de centrales nucléaires et d'accélérateurs de particules comme le LHC de Genève, le forage des tunnels, etc.

Les dimensions de la Terre

En 1756, dans l'article *Figure de la Terre* de l'*Encyclopédie*, d'Alembert écrivait

> *À peine a-t-on reconnu qu'elle était courbe qu'on l'a supposée sphérique ; enfin on a reconnu... qu'elle n'était pas parfaitement ronde ; on l'a supposée elliptique, parce qu'après la figure sphérique, c'était la plus simple qu'on pût lui donner. Aujourd'hui, les observations et recherches multiples commencent à faire douter de cette figure et quelques philosophes prétendent même que la Terre est absolument irrégulière...*
>
> *On voit combien la solution complète de cette grande question demande encore de discussions, d'observations, de re-*

cherches... Quel parti prendre jusqu'à ce que les temps nous procurent de nouvelles lumières ? Savoir attendre et douter.

On ne saurait mieux dire ! Le géoïde terrestre est voisin d'un ellipsoïde de révolution. Depuis 1980, grâce aux observations faites par les satellites, on s'accorde sur ses dimensions. Il est aplati aux pôles avec un taux de $1/298,257$. Le rayon polaire est de 6.356,752 km, plus court de 21,385 km environ que le rayon équatorial, égal à 6.378,136 km. La circonférence méridienne est de 40.007,864 km, plus courte de 67 km environ que la circonférence équatoriale qui est de 40.075,017 km. La superficie de la Terre est de 510.065.000 km carrés, dont 133.620.000 km carrés de continents, soit 26.2 %. Le volume de la Terre est de 1.083.320.000 km cubes, ce qui donne une masse de $5.98\ 10^{24}$ kg et une densité moyenne de 5.515.

Le géoïde correspond à une équipotentielle du champ de gravité terrestre. On le détermine par le niveau moyen des mers, pris comme origine des altitudes. L'altitude maximale des terres émergées est celle de l'Everest (8.850 m) et la profondeur maximale des océans se situe dans la fosse des Mariannes (11.034 m) dans le Pacifique occidental. Signalons que ce n'est qu'en 1852 que le *Great Survey of India* établit que l'Everest (alors appelé *Peak XV*) était la plus haute montagne du monde et culminait à 8.840 m. Des erreurs de mesures furent corrigées en 1955 (8.848 m) puis en 1993 (8.847,7 m). Enfin, en 1999, on obtint 8.850 m à l'aide d'un GPS.

Le géoïde fournirait l'image exacte de la Terre si elle était entièrement recouverte d'océans au repos. Par rapport à un ellipsoïde de révolution qui aurait pour axe la ligne des pôles, il présente des saillies et des dépressions d'une centaine de mètres au maximum. Les deux plus grandes protubérances, d'une amplitude maximale de 80 m, se situent dans le sud-ouest du Pacifique, vers la Nouvelle-Guinée, et dans l'Atlantique nord, approximativement aux antipodes l'une de l'autre. La plus grande dépression, d'une amplitude de 100 m environ, se situe dans l'océan Indien, au sud de l'Inde. À cet endroit, la surface de l'océan est plus proche du centre de la Terre qu'elle ne l'est près de l'Indonésie, bien qu'il n'y ait aucune différence d'altitude entre ces deux lieux. Des protubérances et des dépressions moins importantes existent. Elles ont été repérées par des analyses physiques et mathématiques très fines des perturbations des trajectoires des satellites artificiels. La distribution de ces ondulations du géoïde n'est pas liée à des structures superficielles déterminées mais à des irrégularités dans la répartition des masses à l'intérieur de la Terre

et aux phénomènes de convection thermique qu'elles engendrent. Elle fait encore l'objet de conjectures.

Deux grandes ceintures montagneuses ont été identifiées grâce aux satellites : l'une péripacifique, à prédominance méridienne, l'autre latitudinale, des Caraïbes à l'Indonésie. Mais la plus grande chaîne est formée par les rides médio-océaniques ; elles s'élèvent en moyenne à 2.000 m au-dessus des plaines abyssales et sont longues de 60.000 km. Les satellites ont également permis de révéler des structures sous-marines insoupçonnées et même de mesurer les variations du géoïde au cours du temps. On s'est ainsi aperçu que l'aplatissement de la Terre diminuait, un phénomène lié à la fonte de la calotte glaciaire qui recouvrait l'hémisphère Nord il y a quelques 20.000 ans. (voir Biblio : Cazenave, Passeron, Ricard).

Pour terminer ce chapitre, il peut être intéressant de donner certains des points de vue qu'Alexander von Humboldt développe dans son monumental ouvrage *Cosmos, essai d'une description physique du Monde* rédigé dans les dernières années de sa vie et publié à partir de 1845. Son but est de décrire toutes les connaissances de l'époque sur les phénomènes terrestres et célestes. Mais il y exprime également des vues tout à fait générales et originales comme celle-ci (Introduction du tome IV)

> *Quel rapport existe entre l'attraction réciproque des molécules, considérée comme une cause de mouvement perpétuel à la surface et très-vraisemblablement à l'intérieur de la Terre, et la gravitation qui met aussi en mouvement perpétuel les planètes et leurs soleils ? La solution même partielle de ce problème purement physique serait la conquête la plus glorieuse à laquelle puissent prétendre, dans un tel ordre de faits, les efforts réunis de l'expérimentation et de la réflexion...*
>
> *Si, dans l'état actuel de nos connaissances, on n'est pas encore en mesure de réduire à une seule et même loi les deux espèces de forces attractives : celle qui agit à des distances appréciables, comme la pesanteur et la gravitation, et celle qui n'agit qu'à des distances incommensurables par leur petitesse, comme l'attraction moléculaire ou attraction de contact, il est à croire cependant que la capillarité et l'endosmose, si importante pour l'ascension de la sève et pour la*

> *physiologie des animaux et des plantes, ne sont pas moins subordonnées à la pesanteur et à sa distribution locale que les phénomènes électro-magnétiques et les transformations chimiques.*

Dans le premier chapitre du tome IV, Humboldt expose les mesures effectuées pour déterminer la figure de la Terre ainsi que les travaux théoriques correspondants. De nombreux noms, dont il n'a pas été fait mention ici, sont cités. Puis, l'auteur passe à des considérations sur la chaleur interne de notre planète et à sa distribution, puis à son activité magnétique. Enfin, il s'intéresse aux tremblements de terre, aux sources gazeuses et thermales et aux volcans dont il donne une liste. Le volume se termine par une discussion de la composition minéralogique des roches volcaniques.

Cosmos est l'œuvre d'une vie, celle d'un encyclopédiste, à la fois héritier des Lumières et savant de son temps.

La topographie

La topographie, du grec *topos* (lieu), consiste à représenter graphiquement une partie plus ou moins étendue de la surface de la Terre. Le mot semble avoir a été utilisé pour la première fois par l'astronome et mathématicien allemand Petrus Apianus (Leisnig, Saxe, 16 avril 1495 - Ingolstadt, 21 avril 1552), de son vrai nom Peter (von) Bennewitz ou Bienewitz. Dans son ouvrage *Astronomicum Caesareum*, de 1540, il propose d'utiliser les éclipses solaires pour déterminer la longitude. Le livre contient également la description de cinq comètes, dont celle de Halley, et l'auteur fait la remarque que leur queue pointe toujours à l'opposé du Soleil.

La topographie semble être née du besoin, en Égypte et en Babylonie, d'établir les plans des propriétés terriennes. Les Grecs utilisaient le niveau, la mire, la chaîne et savaient mesurer les angles, mais ils ne firent guère progresser la topographie. Dans son *Traité de l'art militaire*, l'historien latin Végèce (fin du IVe siècle) insistait sur la nécessité pour les armées de disposer de cartes détaillées, mais ne donnait aucune indication ni sur leur contenu, ni sur la manière de les dresser. Quand Cassini de Thury publia sa carte de France au 1/86.400e, les techniques n'avaient que peu évolué depuis l'Antiquité.

Le problème majeur auquel est confronté le topographe est l'impossibilité de représenter de façon rigoureusement correcte le géoïde terrestre sur un plan. Il faut donc commencer par définir une correspondance entre les points de la Terre et ceux de sa représentation plane : c'est la notion de *système de projection*. Comme la Terre n'est pas une surface développable sur un plan (c'est-à-dire exactement représentable sur un plan, comme l'est un cylindre), cette projection donne nécessairement lieu à des déformations.

Une autre notion essentielle en topographie est celle d'*échelle* d'une carte. Si 1cm sur la carte en représente n sur le terrain, on dit que la

carte est au $1/n$ ème. Plus l'échelle est grande et plus de petits détails peuvent y être portés. Plus l'échelle est petite et plus il est fondamental de tenir compte de la rotondité de la Terre. Il faut que la projection soit la plus précise possible. Selon l'échelle, les méthodes de projection peuvent ainsi différer.

Les systèmes de projection

Il est impossible de représenter exactement, sans déformation, la surface tridimensionnelle de la Terre sur une carte plane qui n'a que deux dimensions et cela quelle que soit la projection utilisée. De plus, les déformations augmentent avec la surface couverte. C'est pour pallier à cette impossibilité que de nombreuses projections différentes ont vu le jour. Les globes ne présentent évidemment pas ces inconvénients bien que, cependant, des déformations ne puissent être évitées puisque la Terre n'est pas une sphère mais est voisine d'un ellipsoïde.

En sciences, il est souvent difficile de changer de dimension et, quand on essaye de le faire, plusieurs solutions peuvent exister, chacune présentant des propriétés intéressantes que les autres ne possèdent pas, chacune ayant sa justification propre. Pour illustrer cela, prenons le problème inverse de celui qui nous occupe ici. Vous n'êtes pas un terrien, je vous donne une mappemonde plane du monde, donc à deux dimensions, je ne vous dis rien sur la manière dont cette carte a été établie, je vous dis seulement qu'elle est la représentation plane d'un objet à trois dimensions et je vous demande de me dire quelle est la forme de cet objet. Je suis certain que plusieurs représentations vous viendront à l'esprit, que vous serez capable de me fournir plusieurs solutions, toutes aussi valables les unes que les autres. C'est également l'histoire de *Flatland*, univers allégorique créé en 1884 par Edwin Abbott Abbott (Marylebone, 20 décembre 1838 - Hampstead, 12 octobre 1926), professeur et théologien anglais, dans lequel des objets à deux dimensions, vivants dans un plan, voient brusquement apparaître une sphère. Comment un carré peut-il concevoir l'existence d'une sphère ? De même, comment un point dont l'univers se réduit à la ligne sur laquelle il vit, concevrait-il une existence sur une surface à deux dimensions ? La surface pourrait être plane, être finie ou non, mais ce pourrait également être la surface finie d'une sphère ou d'un tore, ou celle infinie d'un cone ou d'un cylindre. Quel est le nombre de dimensions de la célèbre bande du mathématicien et astronome allemand August Ferdinand Möbius (Schulpforta, Saxe, 7

novembre 1790 - Leipzig, 26 septembre 1868), qui ne présente qu'un seul côté ? Tout cela montre la difficulté à changer de dimension, à représenter un objet dans une dimension qui n'est pas la sienne propre. C'est toute l'histoire (mathématique et cartographique) des projections.

Commençons par des définitions. On appelle *conforme* une projection qui conserve les angles. On parle de projection *équivalente* lorsque ce sont les surfaces qui sont conservées localement. Une projection ne peut être à la fois équivalente et conforme. Lorsque, sur un méridien, les distances à partir d'un point donné sont conservées, il s'agit de projection *équidistante*. Les projections les plus utilisées sont les projections conformes à cause de l'importance des angles dans les opérations de mesure. Cependant, à petite échelle, on utilise souvent une projection équivalente. Une projection qui n'est ni conforme, ni équivalente est dite *aphylactique* ; elle peut être équidistante. Mais, dans tous les cas, aucune projection ne peut conserver toutes les distances.

Une autre manière d'aborder les différents systèmes de projection est de s'intéresser à leur *canevas*, c'est-à-dire à l'image des méridiens et des parallèles. On les classe ainsi en trois catégories principales : *coniques, cylindriques* et *azimutales.*

Les projections coniques

Dans une projection conique, on projette la surface de la Terre sur un cône tangent à un parallèle de la sphère terrestre et dont l'axe passe par les pôles. Les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en un point qui est l'image du pôle et les parallèles sont des arcs de cercle concentriques et équidistants autour de ce point.

Une projection pseudo-conique qui conserve les surfaces a été proposée vers 1500 par Johannes Stabius (Hueb-bei-Steyr, Haute Autriche, ca. 1460 - Graz, 1er janvier 1522). Il était probablement le fils d'un domestique. Après des études à l'université d'Ingolstadt en 1484, on le retrouve à Nuremberg puis à Vienne. De 1498 à 1503, il enseigne les mathématiques dans son université d'origine. Conrad Celtis (dont nous aurons largement l'occasion de reparler au sujet de la Table de Peutinger), qu'il avait rencontré en 1492, le fait venir à Vienne en 1503. Stabius entre au service de l'empereur Maximilien Ier du Saint-Empire. Il se lie d'amitié avec de nombreux humanistes et poètes, ainsi qu'avec Albrecht Dürer (Nuremberg, 21 mai 1471 - Nuremberg, 6 avril 1528)

qui grave son blason. Lui-même s'essaye à la poésie et Celtis lui décerne en 1502 la palme de *Poeta Laureatus.* Il est, avec Ladislaus Sunthaym (Ravensbourg, 1440 - Vienne, 1513) et Conrad Celtis, l'historien officiel des Habsbourg dont il reconstitue notamment la généalogie à partir d'actes anciens. Dans la projection dont il eut l'idée, appelée également *cordiforme*, la Terre a la forme d'un cœur. Elle fut publiée en 1514 par Johannes Werner (Nuremberg, 14 février 1468 - Nuremberg, mai 1522). Souvent connue sous la dénomination de projection de *Stab-Werner*, elle fut utilisée tout au long des XVIe et XVIIe siècles, en particulier par Mercator, Oronce Fine (Briancon, 20 décembre 1494 - Paris, 8 août 1555), savant renommé pour ses nombreuses contributions et ardent défenseur des mathématiques, et Ortelius pour l'Asie et l'Afrique, avant d'être abandonnée au profit de la projection de Mercator. Au XVIIIe siècle, la projection de Bonne, dont elle est un cas particulier, lui sera préférée pour les cartes continentales. La projection cordiforme est inspirée de la projection homéotère décrite par Ptolémée, mais qui semble due à Hipparque, dans laquelle les parallèles sont des cercles concentriques et les méridiens sont des courbes tracées point par point. Elle est développée en y rajoutant les régions extrêmes, à l'est et à l'ouest (c'est-à-dire voisines du méridien opposé au méridien central), qui sont très déformées. Pour l'hémisphère Sud, on effectue la construction symétrique. L'équateur est représenté par deux arcs de cercle opposés et tangents au méridien central. C'est la solution adoptée par Mercator en 1538 et par l'explorateur et cartographe Guillaume Le Testu (Le Havre, 1509 - Mexique, 31 mars 1573) en 1566. On peut également situer le centre commun des parallèles au pôle Nord (ou à son voisinage) et tracer les parallèles de l'hémisphère Sud concentriques à ceux de l'hémisphère Nord. L'hémisphère Sud est alors considérablement déformé et l'ensemble affecte la forme d'un cœur.

La projection dite de Bonne remonte à 1520. Elle a été définie de façon rigoureuse vers 1780 par l'ingénieur hydrographe Rigobert Bonne (Raucourt, 1727 - Paris, 1795). Son fils Charles-Marie Rigobert Bonne (Paris, 25 juin 1771 - Paris, 23 novembre 1839), dit le chevalier Bonne, nommé maréchal de camp le 31 décembre 1831, poursuivra son œuvre. Cette projection est utilisée dans la carte d'État-Major au 1/80.000e de la France. C'est une projection pseudo-conique équivalente. Les méridiens ne sont pas des droites concourantes, mais les parallèles sont des arcs de cercle concentriques équidistants dont le centre est situé à une extrémité du méridien central. Les altérations d'angles et de longueurs augmentent rapidement quand on s'éloigne du méridien central et du parallèle d'ori-

gine. Cette projection est la transcription mathématique de la projection homéotère de Ptolémée. Les coordonnées des intersections des méridiens et des parallèles ont été déterminées par l'ingénieur géographe Plessis, du Dépôt de la guerre, en utilisant les résultats de Delambre et Méchain et de Bouguer. Cette projection, connue sous l'appellation de *projection du Dépôt de la guerre*, a été appliquée dès 1803 à toutes les cartes topographiques et a également été adoptée, au XIXe siècle, par un certain nombre de pays d'Europe occidentale.



Mappemonde cordiforme d'Oronce Fine (1536)

La projection conique conforme du mathématicien Johann Heinrich Lambert (Mulhouse, 26 août 1728 - Berlin, 25 septembre 1777) date de 1772. C'est, de loin, la plus importante. Les surfaces sont conservées le long de tous les parallèles. Elle a d'abord été introduite dans l'armée pour plus de commodité dans les tirs d'artillerie. Ce système de projection est très utilisé pour dresser les cartes des régions nordiques, telles que celles

du Canada et des États-Unis. Ainsi, il y a une moindre distorsion de l'ensemble du territoire. Cette projection est également à la base de la cartographie française à grande échelle (carte de France au 1/25.000e).

Une projection tronconique équivalente est celle d'Heinrich Christian Albers (Altona, 1773 - 1833) en 1805. Le pôle est représenté sous la forme d'un petit arc de cercle, car il n'est pas le centre de la projection. On peut l'améliorer en encadrant la région à cartographier par deux parallèles de contact appelés fondamentaux ou standards. Ce type de projection est très utilisé parce qu'il déforme très peu les détails situés près du centre de la carte (par exemple, la carte au 1/25.000e des USA).

Les projections cylindriques

Les projections cylindriques sont réalisées en enfermant la Terre dans un cylindre tangent à l'équateur et dont l'axe est donc confondu avec celui des pôles. Chaque point de la Terre est représenté par le point où une demi-droite issue du centre de la Terre et passant par ce point rencontre le cylindre. Les méridiens sont des droites verticales équidistantes et les parallèles des droites horizontales. Plus on s'éloigne de l'équateur et plus les distances sont amplifiées. Les zones voisines des pôles sont donc fortement disproportionnées et distordues. Ainsi la Suède est-elle 7,4 fois plus grande que le Cameroun alors que ces deux pays ont la même superficie.

Ce type de carte est très utile pour la navigation car le chemin le plus direct (c'est-à-dire à cap constant) entre deux points est donné par la droite qui les joint, appelée *ligne de rhumb* (ou rumb), puis *loxodromie* à partir du XVIIe siècle (du grec *loxos*, oblique, et *dromos*, course ou route). C'est cette propriété qui en fit le succès. Quand un navire suit la ligne de rhumb donnée par la rose des vents (la boussole fut transmise en Europe par les Arabes vers 1300), il coupe tous les méridiens sous un même angle. Le mathématicien portugais Pedro Nuñes (Alcácer do Sal, Portugal, 1502 - Coimbra, 11 août 1578) publia en 1537 des tables qui fournissent la longitude et la latitude d'un bateau le long du rhumb. La loxodromie ne fournit pas le chemin le plus court ; c'est l'*orthodromie* qui le donne. Le chemin le plus court passe plus au nord dans l'hémisphère Nord et plus au sud dans l'hémisphère Sud, il suit un grand cercle du Globe. Ainsi, entre le cap Horn et le cap de Bonne-Espérance, la différence entre les deux routes est de 370 km. C'est aussi pour cela qu'un voyage entre l'Europe et l'Amérique du Nord passe près

des zones de dérive des icebergs. Le travail de Nuñes est issu de ses discussions avec le fameux navigateur Martim Afonso de Souza (Vila Viçosa, ca. 1490/1500 - Lisbonne, 21 juillet 1564 ou 1571) qui avait reçu en 1530 la mission de naviguer dans l'hémisphère Sud avec plusieurs bâtiments et de reconnaître le Rio de la Plata, donnant ainsi son nom à Rio de Janeiro. Revenu au bout de trois ans, il exposa à Nuñes différentes manières de calculer la hauteur des astres pour en déduire la route à suivre. Il lui fit observer qu'en naviguant dans une direction perpendiculaire au méridien, il voyait sur la sphère qu'il devait croiser l'équateur tandis qu'en réalité, en se dirigeant toujours à l'est ou à l'ouest, il gardait la même latitude sans jamais s'en approcher. Dans son *Tratado sobre certas dúvidas da navegação* de 1537, Nuñes explique qu'il est impossible de couper l'équateur parce qu'on ne suit pas en fait un grand cercle mais que, la route n'étant donnée que par la boussole, le timonier doit dévier de temps en temps le navire pour conserver son cap à l'est ou à l'ouest, suivant ainsi un parallèle ; c'est un cas particulier de loxodromie qu'il est donc le premier à avoir étudié. (voir Biblio : Guimarães).

La plus célèbre des projections est, sans conteste, celle de Mercator (Rupelmonde, 5 mars 1512 - Duisburg, 2 décembre 1594), mathématicien et géographe flamand, Gerhard Kremer de son vrai nom (en allemand Krämer signifie « petit commerçant »). Elle s'apparente, avec quelques modifications, à une projection cylindrique. Il commença à y travailler en 1538. Son but était de représenter par une droite la trajectoire d'un navire gardant un cap constant. Il était naturel de dessiner des parallèles équidistants et perpendiculaires aux méridiens, comme c'est le cas sur une sphère. Mais l'inconvénient était que les parallèles avaient tous la même longueur, celle de l'équateur, alors qu'ils deviennent plus courts lorsque l'on se rapproche du pôle. Mercator eut l'idée de les espacer de plus en plus selon la latitude. Restait à calculer à quelle latitude se trouvait chacun de ses parallèles. Mercator utilisa l'idée qu'un plan tangent à une sphère s'en écarte peu sur de petites distances et calcula de proche en proche, par des formules simples de trigonométrie, la latitude de chaque parallèle s'il se déplaçait en suivant un cap de 45 degrés. Sa projection conservait les angles, mais, pour permettre la navigation, l'échelle variait et, en conséquence, elle dilatait largement les zones tempérées au détriment des tropiques. Mercator ne dévoila jamais le raisonnement qui l'avait conduit à sa méthode et celle-ci ne fut expliquée qu'en 1599 par Edward Wright (Garveston, octobre 1561 - Londres, novembre 1615)

dans son livre *Certaine errors in navigation corrected* où il donne une table de la somme de l'inverse des cosinus de seconde en seconde d'angle jusqu'à la latitude de 75°. Edmund Halley reviendra, en 1695, sur le travail de Wright et montrera que *sur le Globe, les lignes de rhumb font un angle constant avec chaque méridien, et,..., également un angle constant avec les méridiens en projections stéréographiques sur le plan de l'équateur.* Du point de vue mathématique, la projection de Mercator se ramène au calcul d'une intégrale définie et fait appel à la fonction logarithme. Mais calcul intégral et fonction logarithme étaient inconnus à l'époque. De nos jours, la projection de Mercator est toujours utilisée quand la représentation des surfaces est de peu d'importance, comme c'est le cas pour les liaisons intercontinentales, et que l'on veut pouvoir mesurer facilement la distance entre deux points.

Lambert eut également l'idée d'une projection de Mercator où les rôles de l'équateur et d'un méridien sont échangés : l'axe du cylindre de projection est perpendiculaire à l'axe des pôles, le cylindre est donc tangent à la Terre aux pôles. On développe ensuite celui-ci le long d'un méridien pour obtenir une représentation plane. C'est la projection de Mercator transverse, ou UTM (Universal Transverse Mercator), qui n'est autre, à l'origine, que celle développée par Gauss en 1822 et analysée par Johannes Heinrich Louis Krüger (Elze, 21 septembre 1857 - Elze, 1er juin 1923) en 1912. Elle s'adapte parfaitement à un ellipsoïde en effectuant d'abord une projection conforme de celui-ci sur une sphère. Son utilisation principale est la cartographie de l'ensemble de la planète à l'exception des pôles. Sur la carte plane, les méridiens ne sont plus parallèles mais convergent et la loxodromie n'est plus une droite. Les parallèles coupent les images des méridiens à angle droit. En pratique, pour couvrir la surface de la Terre, on la découpe en 60 fuseaux de 6 degrés chacun, en séparant les deux hémisphères. On développe ensuite le cylindre tangent à l'ellipsoïde le long d'un méridien pour obtenir une représentation plane. Chaque fuseau est utilisable sur l'ensemble des latitudes. Une table unique permet d'effectuer les calcul géodésiques et les transformations de coordonnées quelle que soit la position géographique de la région considérée, d'où la qualification d'universel donné à ce système de représentation. Cette projection facilite la représentation des pays qui s'étendent beaucoup en latitude mais pas en longitude, comme c'est le cas pour le Chili par exemple. Elle est utilisée, en particulier, par l'*U.S. Army Map Service*, sert à l'unification des réseaux géodésiques européens et est également utile pour les vols passant près du pôle.

Les projections azimutales

Une projection s'effectue sur un plan tangent au Globe en n'importe quel point. Lorsque ce point est le pôle, les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en l'image du pôle et les parallèles sont des cercles concentriques autour de ce point. On distingue les projections planes de type gnomonique, orthographique et stéréographique. La projection gnomonique correspond à des rayons projetés du centre de la Terre. Dans une projection orthographique, la source des rayons se situe à l'infini et les cartes conçues selon ce procédé donnent l'impression que la Terre a été photographiée depuis l'espace. Dans le cas d'une projection stéréographique, la source des rayons est le point diamétralement opposé au point de contact de la sphère terrestre et du plan sur lequel est réalisée la projection. Plus l'on s'écarte du point de contact et plus elle dilate les régions considérées.

La nature de la projection varie selon la source des rayons. Ainsi, la projection gnomonique couvre des zones plus petites qu'un hémisphère alors que la projection orthographique couvre les hémisphères ; la projection azimutale équivalente et la projection stéréographique correspondent à des zones plus larges, et la projection azimutale équidistante concerne le Globe tout entier. Dans tous ces types de projection (à l'exception de la projection azimutale équidistante), la partie de la Terre qui apparaît sur la carte dépend du point de contact du plan imaginaire avec la Terre : une carte de projection plane dont le plan est tangent à la surface de la Terre au niveau de l'équateur représente la zone de l'équateur, mais on ne peut pas représenter toute la région sur une même carte ; si le plan est tangent à l'un des pôles, la carte représente les régions polaires.

Dans la mesure où la source de la projection gnomonique est au centre de la Terre, tous les grands cercles sont représentés par des droites. Un grand cercle qui relie deux points sur la Terre correspond toujours à la distance la plus courte entre ces deux points. C'est pourquoi la carte gnomonique est très utile pour la navigation quand elle est utilisée avec la carte de Mercator.

La projection stéréographique est la plus ancienne connue. Ce terme fut introduit par le mathématicien jésuite belge d'origine hispanique François d'Aiguillon (Bruxelles, 4 janvier 1567 - Tournai, 20 mars 1617) en 1613 dans la sixième et dernière partie de son livre *Opticorum Libri Sex philosophis juxta ac mathematicis utiles*, ouvrage connu pour les gravures de Pierre Paul Rubens (Siegen, près de Cologne, 28 juin 1577 -

Anvers, 30 mai 1640) sur la couverture et au début de chaque partie. Au pôle Sud, on place un plan tangent perpendiculaire à l'axe de la Terre. Chaque point de la Terre est l'aboutissement sur ce plan tangent de la droite qui passe par le pôle Nord et le point considéré. Ceci permet de représenter toute la sphère sur le plan, à l'exception du pôle Nord. Cette projection ne respecte pas les distances mais, de toutes, c'est la seule qui ne fausse pas les formes des petites surfaces ; elle est conforme.

L'étude de ce type de projection a grandement été influencée par la construction des astrolabes. Elle correspond à la carte plate parallélogrammatique d'Hipparque qui inventa la première projection de l'histoire, lointaine ancêtre de celle de Mercator, et était connue de Ptolémée. C'est l'astronome et ingénieur Al-Farghani (Ferghana en Sogdiane, actuel Ouzbékistan, 805 - 880), qui vivait à Bagdad et au Caire, qui démontra que cette projection transforme tout cercle de la sphère soit en un cercle soit en une droite. En Europe, il fallut attendre Jordanus Nemorarius (Allemagne, ca. 1225 - 1260) pour que cette propriété soit connue. La conformité de cette projection ne sera établie que beaucoup plus tard. Dans son livre *Astrolabium*, paru en 1593, le savant jésuite Christophorus Clavius (Bamberg, 25 mars 1538 - Rome, 2 février 1612) montra comment déterminer l'angle d'intersection de deux grands cercles sur une sphère en mesurant celui de leurs images sur le plan, ce qui revenait à prouver que la projection était conforme. La conformité fut également démontrée vers la même époque par le mathématicien et astronome anglais Thomas Harriot (Oxford, 1560 - Londres, 2 juillet 1621). En 1696, Edmund Halley présenta un mémoire à la *Royal Society* de Londres dans lequel il en donnait une nouvelle démonstration en précisant cependant que cette propriété lui avait été signalée par le mathématicien français Abraham de Moivre (Vitry-le-François, 26 mai 1667 - Londres, 27 novembre 1754) et que Robert Hooke (Freshwater, 18 juillet 1635 - Londres, 3 mars 1703) l'avait déjà présentée à la *Royal Society*.

La projection azimutale équidistante de Guillaume Postel (Barenton, 25 mars 1510 - Paris, 6 septembre 1581) n'est ni équivalente ni conforme. Les coordonnées sont courbes. La distance et la direction sont exactes à partir du point central, ce qui la rend très appréciée en navigation. En vue polaire, les méridiens et les parallèles sont divisés de manière à préserver l'équidistance. Toutes les formes sont faussées, sauf au centre, et la déformation s'accroît au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. Les projections en vue polaire sont les mieux adaptées pour les

régions de grandes latitudes car on peut aller jusqu'au 51e parallèle avec une déformation de seulement 15%. C'est ainsi que la carte se trouvant sur le drapeau de l'ONU représente le monde en projection azimutale équidistante centrée sur le pôle Nord. La mappemonde de Postel date de 1578. Elle est très détaillée, l'hémisphère Nord comportant 2.170 noms contre 540 pour les deux parties australes.

En 1772, Johann Heinrich Lambert proposa une projection azimutale équivalente. Dans sa version polaire, les méridiens sont rectilignes et concourants. L'espacement des parallèles a été calculé de façon que la surface de toutes les mailles du réseau soit identique. La déformation s'accroît radialement et les formes sont aplaties dans le sens des parallèles. On peut s'éloigner jusqu'à 42 degrés du centre avec moins de 15% de déformation. Cette projection est utilisée, lorsqu'elle est centrée sur le pôle ou sur un point de l'équateur, pour des densités de population, des frontières politiques et des cartes océaniques ou thématiques.

Les autres projections

Un certain nombre d'autres projections ont été développées pour figurer dans le détail des zones importantes à une petite échelle. Fondées sur des calculs mathématiques, ces cartes représentent la Terre entière selon des cercles, des ellipses ou d'autres formes. Dans le cas de cartes spécialisées, la Terre est souvent dessinée en ne suivant pas la forme originale de la projection, mais avec des parties jointes et irrégulières. Les cartes de ce type sont appelées *projections interrompues* et comprennent, par exemple, les six projections équivalentes présentées à partir de 1906 par Max Eckert-Greifendorff (Chemnitz, 10 avril 1868 - Aachen, 26 décembre 1938).

La *projection sinusoïdale* est un cas particulier de celle de Bonne. Elle fut utilisée par Samuel de Champlain (Brouage, ca. 1567 - Québec, 25 décembre 1635) en 1632 pour sa carte de la Nouvelle-France, immense territoire qui comprenait toutes les colonies françaises de l'Amérique du Nord, de l'embouchure du Saint-Laurent au delta du Mississippi, en passant la vallée de l'Ohio. Les parallèles sont des droites régulièrement espacées mais les méridiens ont une forme sinusoïdale. Seul le méridien central est rectiligne. Cette projection est équivalente mais elle est très peu conforme aux pôles. Elle conserve les surfaces et les pôles sont moins déformés que dans une véritable projection cylindrique. Enfin, le Globe présente un rapport largeur/hauteur égal à deux car, à l'est et à l'ouest,

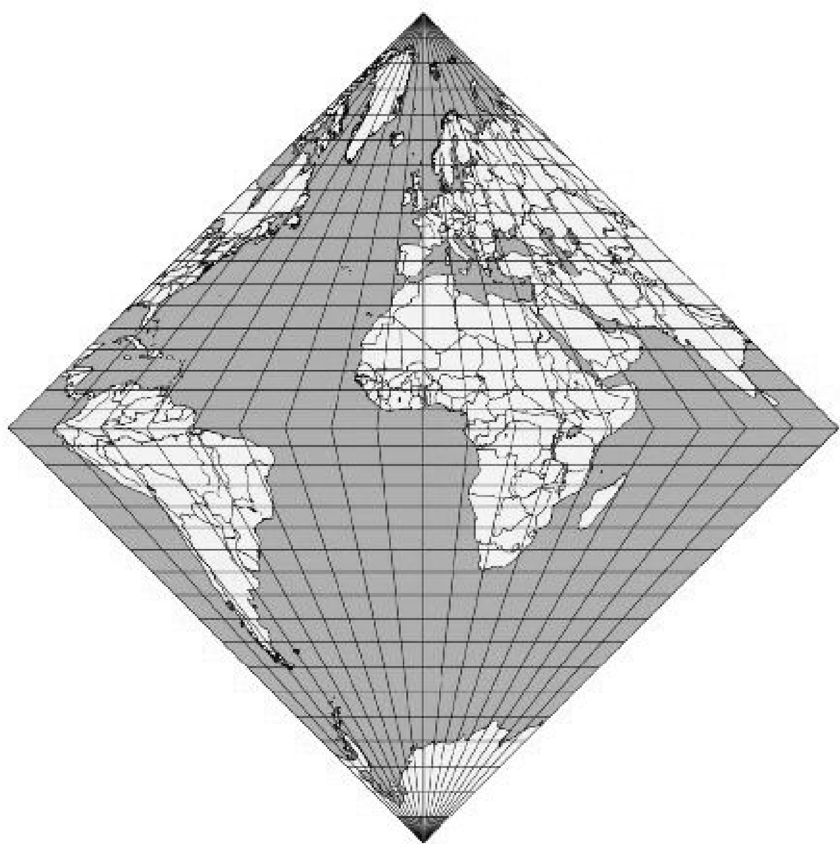
on y ajoutait les terres nouvellement découvertes. Ce type de projection est une variante de celle d'Apianus qui représentait les méridiens par des arcs de cercle coupant l'équateur de façon équidistante. La projection sinusoïdale semble avoir été imaginée par le cartographe dieppois Jehan Cossin en 1570. La projection de Sanson-Flamsteed, qui n'est due ni à l'un ni à l'autre mais peut-être à Mercator, est une modification de la projection sinusoïdale. La carte est découpée selon certains méridiens afin de redresser les continents. C'est une projection interrompue.

Dans la *projection homalographique* (du grec *homalos*, régulier) de Jacques Babinet (Lusignan, 5 mars 1794 - Paris, 21 octobre 1872), Karl Brandan Mollweide (Wolfenbüttel, 3 février 1774 - Leipzig, 10 mars 1825) et Max Eckert-Greifendorff (Chemnitz, 10 avril 1868 - Aix-la-Chapelle, 26 décembre 1938), les parallèles sont rectilignes et les méridiens elliptiques. Le rapport des surfaces des différentes régions représentées sur la carte est le même que leur rapport réel. Cette propriété se retrouve également dans la projection d'Arno Peters (Berlin, 22 mai 1916 - Bremen, 2 décembre 2002), un historien et politologue allemand qui l'introduisit lors d'une conférence de presse en Allemagne en 1974. Elle suscita de nombreux débats. En effet, contrairement à la projection de Mercator, elle propose une vision plus équilibrée du Monde, ne favorisant pas les pays de l'hémisphère Nord mais plutôt ceux du Sud. Elle écrase les pays situés aux latitudes élevées alors que l'Afrique, située sur l'équateur, est beaucoup plus étendue verticalement que dans la réalité. Mais, contrairement à la projection de Mercator, ces régions ne sont que déformées, et non agrandies ou réduites. Cette projection fut adoptée par différents mouvements tiers-mondistes.

En 1923, John Paul Goode (Stewartville, Minnesota, 21 novembre 1862 - 5 août 1932) propose une projection, dite *homolosine*, qui combine la projection sinusoïdale avec celle de Mollweide. Les parallèles y sont rectilignes et équidistants. Son principal intérêt est que les continents ont leur véritable superficie les uns par rapport aux autres, mais au prix de quelques solutions de continuité entre l'équateur et les pôles, ce qui entraîne que les directions et les distances ne sont pas extrêmement précises.

D'étranges projections ont été proposées par Romain Charles Édouard Collignon (Laval, 28 mars 1831 - Paris, 11 août 1913), un scientifique et ingénieur français, en 1865. Elles préservent les surfaces mais distordent les formes. Dans l'une d'elles, le monde est enfermé dans un

losange dont l'équateur occupe la grande diagonale. L'autre diagonale, qui joint les pôles, est de longueur moitié. Les parallèles sont des droites, mais les méridiens, qui partent de chacun des pôles, sont brisés au niveau de l'équateur. En dépit de leurs constructions simples, ces projections sont regardées comme des curiosités. On en trouvera l'explication détaillée et des représentations sur le site
http ://melusine.eu.org/syracuse/mluque/mappemonde/Collignon.pdf
(voir Biblio : Luque-Matarazzo).



Projection de Collignon

La *projection authalique quartique* conserve les surfaces. Elle fut proposée par Karl Siemon en 1937 et, indépendamment, par Oscar Sherman Adams (Monroe Township, Ohio, 9 janvier 1874 - 5 mai 1962) en 1944.

Elle tire son nom du fait que les méridiens sont des courbes du quatrième degré. Elle s'utilise principalement pour réaliser des cartes thématiques du monde.

Il existe de nombreuses autres projections, dont certaines sont récentes comme celle élaborée par Felix W. McBryde et Paul Thomas en 1949 ou la projection orthophanique d'Arthur H. Robinson (Montréal, 5 janvier 1915 - Madison, 10 octobre 2004) qui n'est ni conforme, ni équivalente. Cette dernière date de 1963, mais elle n'a été publiée qu'en 1974. Son avantage est de respecter la configuration des régions. Les méridiens sont équidistants et ont la forme d'arcs elliptiques concaves par rapport au méridien central qui est rectiligne et de longueur égale à la moitié de la celle de l'équateur. Les parallèles sont également équidistants entre les latitudes de 38° nord et sud. Au-delà, les intervalles diminuent.

Toutes ces projections sont pseudo-cylindriques. Elles sont souvent utilisées pour les cartes mondiales générales et thématiques, en particulier celles de la *National Geographic Society* américaine. (Biblio, voir : Kennedy-Kopp)

Les mathématiciens et les projections

Autrefois, il n'existait aucune séparation nette entre les différentes branches de la science. Il n'y avait pas d'un côté les mathématiques, d'un autre l'astronomie, d'un autre encore la physique. On ne parlait pas des sciences, mais de la science. On ne parlait pas de mathématiciens, d'astronomes, de physiciens, mais de savants. Archimède était-il mathématicien pour avoir calculé l'aire d'un segment parabolique ou construit le centre de gravité d'un triangle (à l'aide d'ailleurs d'un certain nombre d'arguments physiques), ou était-il physicien quand il énonçait son fameux principe (tout corps plombé dans un liquide...) ? Newton était-il physicien quand il trouva la loi de la gravitation universelle ou mathématicien pour avoir inventé le calcul infinitésimal ? Puis, peu à peu, avec l'accroissement des connaissances, il devint plus difficile puis pratiquement impossible qu'une seule personne englobe toutes les connaissances. Comme on l'a souvent dit, Henri Poincaré (Nancy, 29 avril 1854 - Paris, 17 juillet 1912) fut sans doute le dernier encyclopédiste. La spécialisation vit le jour, puis vint l'ultra-spécialisation.

Mais la projection d'une surface courbe sur un plan est indéniablement un problème mathématique. Il est donc naturel, qu'à côté des purs cartographes, des savants, que nous nommerons mathématiciens,

s'y soient intéressé. Nous avons déjà rencontré de nombreux mathématiciens penchés sur la forme de l'ellipsoïde terrestre et l'équilibre des masses liquides et visqueuses qui composent notre planète : Bessel, Clairaut, Legendre, Maclaurin, etc.

Les principes généraux de la cartographie mathématique qui sont la conformité (conservation locale des angles, donc des formes) et l'équivalence (conservation locale des surfaces). Une carte ne peut être à la fois conforme et équivalente.

Joseph Nicolas Delisle séjourna à Saint-Pétersbourg de 1726 à 1747. Il y fonda le Département de géographie de l'Académie des sciences et, en 1739-1740, en fut le premier directeur. Le grand mathématicien et physicien suisse Leonhard Euler (Bâle, 15 avril 1707 - Saint-Pétersbourg, 18 septembre 1783) fut appelé à Saint-Pétersbourg en 1727 par Catherine I de Russie, la veuve de Pierre-le-Grand, après le décès de Nicolas II Bernoulli, l'un des membres de cette illustre famille de physiciens et de mathématiciens également originaires de Bâle. Delisle attira Euler au Département de géographie afin de préparer une carte de l'ensemble de l'Empire. Celui-ci commença à travailler sur ce sujet en 1735 quand il fut nommé Directeur de ce département, mais ses résultats ne furent publiés que beaucoup plus tard. L'atlas russe, résultat de sa collaboration avec Delisle, comportait vingt cartes et parut en 1745, alors qu'Euler était retourné à Berlin (il reviendra à Saint-Pétersbourg en 1766 à la suite de désaccords avec Frédéric II de Prusse). Selon lui, cet atlas plaçait les Russes à un niveau de cartographie bien supérieur à celui des Allemands.

C'est de 1772 que date la première analyse mathématique de la projection de Mercator et des autres projections. Cette année-là, Johann Heinrich Lambert donne les formules générales de représentation conforme d'une sphère sur un plan. Il se pose le problème de la compatibilité entre la préservation des angles et celle des surfaces et note que ces deux propriétés ne peuvent être réalisées simultanément. Les angles sont conservés dans la projection de Mercator et dans la projection stéréographique. Dans ses arguments, il n'utilise pas de variables complexes. Dans le même mémoire, il présente sa nouvelle projection conique, qui est conforme.

En 1775, Euler s'intéresse aux équations différentielles considérées par Lambert, mais d'un point de vue plus général et en faisant appel aux méthodes qu'il avait utilisées en 1769. Il présente trois communications à l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg. Dans celle intitulée *Sur la représentation de la surface d'une boule sur un plan*, il fait appel aux

variables complexes et à leur forme trigonométrique. Mais Euler ne cite pas les travaux de Lambert qui, lui-même, avait passé sous silence le travail d'Euler de 1769.

Lambert avait mentionné à Joseph-Louis Lagrange (Turin, 25 janvier 1736 - Paris, 10 avril 1813), alors président de l'Académie des sciences de Berlin, les problèmes sur lesquels il travaillait. En 1779, Lagrange y présente deux longs mémoires sur la construction des cartes géographiques. Son but est de généraliser les travaux de ses deux prédécesseurs. Il cherche toutes les projections qui transforment un cercle tracé sur une sphère en un cercle du plan et il donne des formules pour construire la meilleure projection conforme lorsque méridiens et parallèles sont représentés par des arcs de cercle. Laplace lui écrit le 14 février 1782

> *Vos deux Mémoires sur la construction des cartes géographiques ne m'ont pas fait moins de plaisir. J'ai surtout admiré la manière élégante dont vous tirez de la solution générale du problème le cas où le méridien et les parallèles sont représentés par des cercles. Votre analyse a d'ailleurs le mérite d'être utile dans la pratique pour la construction des cartes particulières, et j'ai engagé un de mes amis, qui vient d'annoncer un grand atlas, à en faire usage.*

Notons que l'appellation de projection conforme est apparue pour la première fois sous la plume de Friedrich Theodor Schubert, le fils, en 1788.

Carl Friedrich Gauss, surnommé le *prince des mathématiciens*, se voit confier, en 1818, la cartographie du royaume de Hanovre. À cette occasion, il invente la théorie des erreurs basée sur la méthode des moindres carrés et la courbe en cloche qui porte son nom, il perfectionne la triangulation grâce à son héliotrope, un appareil qui réfléchit les rayons du Soleil, et pressent l'existence des géométries non euclidiennes. En 1822, il résout complètement le problème de la représentation conforme d'une surface simplement connexe (c'est-à-dire sans trou) de dimension deux sur une autre. Il démontre que la représentation conforme d'une petite surface sur un plan est toujours possible. L'une des grandes idées de sa démonstration est l'utilisation géométrique des nombres complexes pour représenter les points du plan, ce que tout bachelier scientifique sait maintenant faire. Ainsi, une surface de dimension deux est-elle décrite par un seul nombre et devient-elle donc de dimension un, c'est-à-dire

une courbe complexe. Une sphère devient une droite (complexe). Elle est projective (un adjectif dont la définition nous entraînerait trop loin) si l'on rajoute au plan un point à l'infini, point qui n'est autre que le pôle Nord. On obtient alors la *sphère de Riemann*, due à Bernhard Riemann (Breselenz, Hanovre, 17 septembre 1826 - Selasca, Italie, 20 juillet 1866), un élève de Gauss. La voie est ouverte aux travaux d'Henri Poincaré, de William Paul Thurston (né le 30 octobre 1946 à Washington, D.C.) et de Grigori Perelman (né le 13 juin 1966 à Saint-Pétersbourg) qui obtiendra la médaille Fields en août 2006 et la refusera.



Ancien billet allemand de 10 Marks

En 1856, le célèbre mathématicien russe Pafnouty Lvovitch Tchebychev (ou Tchebicheff) (Okatovo, 4 mai 1821 - Saint-Pétersbourg, 26

novembre 1894), ou Chebyshev selon l'orthographe anglo-saxonne, publie deux mémoires sur la construction des cartes. Il y affirme que la meilleure projection conforme possible d'une partie de la surface de la Terre est celle où le rapport d'agrandissement est constant sur le bord de la surface projetée. Dans le cas de la projection de Lagrange, cette courbe doit alors être, dans sa projection stéréographique, une ellipse. Il relie ce problème à celui de la recherche des polynômes qui s'écartent le moins possible de zéro entre -1 et +1, les fameux *polynômes de Tchebychev*. Son élève, Andreï Andreïevitch Markov (Riazan, 2 juin 1856 - Saint-Pétersbourg, 20 juillet 1922) trouve la représentation la plus avantageuse d'une partie d'une surface de révolution sur un plan. Ces travaux menèrent à la vaste théorie mathématique de la meilleure approximation, dite *au sens de Tchebychev*, des fonctions ainsi qu'au problème de Dirichlet pour les équations aux dérivées partielles qui fut traité par Dmitry Aleksandrovich Gravé (Kirillov, 6 septembre 1863 - Kiev, 19 décembre 1939) dans sa thèse soutenue en 1896 sous la direction d'Aleksandr Nikolaevich Korkin (Zhidovinovo, 19 février 1837 - Saint-Pétersbourg, 1er septembre 1908), un élève de Tchebychev. (voir Biblio : Ermolaeva, Ghys, Kastrup, Szpiro).

Le travail de terrain

Le travail du topographe sur le terrain se décompose en triangulation et en nivellement. Il est ensuite nécessaire de reporter le plan levé sur le terrain afin de préparer l'exécution de la carte proprement dite.

La triangulation

En premier, il faut choisir les points géodésiques primordiaux qui serviront à la triangulation. Les points obtenus par triangulation sont reportés sur un *canevas* et forment un *réseau*. Ils doivent être facilement repérables comme des sommets, des tours ou des clochers.

À cause des accidents de terrain, il est plus facile et plus précis de mesurer des angles que des longueurs. C'est ce qui fait l'avantage de la triangulation. De plus les angles ne dépendent pas de l'altitude des points. Ce sont les mesures géodésiques. On commence par mesurer l'un des côtés du premier triangle avec le maximum de précision ; c'est la base. Les deux points de départ doivent donc être situés, si possible, sur un terrain plat et uni. Pour cette opération, on utilisa d'abord des règles

en bois puis des chaînes d'arpenteur en métal. Ensuite des procédés plus précis furent introduits, comme ceux de Delambre et Méchain. En 1896, Edvard Jäderin (Stockholm, 5 mars 1852 - 24 novembre 1923), un professeur de géodésie de l'École polytechnique de Stockholm, eut l'idée d'utiliser deux fils tendus, l'un en acier ordinaire et l'autre en bronze. Ils permettaient, par leur différence de dilatation, de calculer la température et de déterminer exactement la longueur mesurée. Ce système fut remplacé, un an plus tard, par un seul fil en invar (abréviation d'invariable), un alliage d'acier et de 18% de nickel dont le coefficient de dilatation est très faible, une invention du physicien suisse Charles-Edouard Guillaume (Fleurier, Jura suisse, 15 février 1861 - Sèvres, 13 juin 1936) pour laquelle il reçut le prix Nobel de physique en 1920. C'est avec un fil d'invar de 24 mètres de long, tendu par deux poids de 10 kg, que fut établie la base du tunnel du Simplon. Le travail fut exécuté par trois équipes se relayant jour et nuit pendant cinq jours. La triangulation et le tracé du tunnel du chemin de fer, entre Brigg et Domodossola, furent réalisés de 1898 à 1905 sous la direction de Max Rosenmund (Liestal, 12 février 1857 - Zürich ?, 18 août 1908) , professeur à l'École polytechnique fédérale de Zürich. Le tunnel, d'une longueur totale de 19.770 mètres, comporte deux galeries identiques et parallèles, distantes de 17 mètres. Entre la longueur déterminée par triangulation et celle mesurée directement, la différence est de 635 mm !

Après avoir mesuré la base, on mesure les angles entre les différents points du réseau à l'aide d'une alidade à pinnules. L'alidade est un instrument employé pour viser et tracer des directions. Il a été inventé par Archimède au IIIe siècle. Il comporte une règle avec deux pinnules. Elle pivote sur un cercle gradué et est montée sur la planchette d'un goniographe dont il faut très soigneusement régler l'horizontalité. La règle comporte un biseau gradué le long duquel on trace le trait qui correspond à la direction de l'objet pointé. Afin de limiter les incertitudes, les angles ne doivent pas être trop petits. À partir de la longueur d'un côté et des deux angles adjacents, la trigonométrie nous apprend qu'il est possible de calculer la longueur des deux autres côtés du triangle ainsi que le troisième angle. De proche en proche, on obtient ainsi les angles et les côtés de tous les triangles. Il faut éviter d'avoir des angles trop aigus ou trop obtus car une petite erreur sur leur valeur entraîne une erreur importante sur la longueur des côtés. Les triangles les plus favorables sont ceux qui se rapprochent d'un triangle équilatéral. Pour vérifier les mesures, on utilise souvent plusieurs bases. Les différences

entre leurs longueurs mesurées et calculées servent alors à évaluer la précision du travail et permettent de minimiser les erreurs. On multiplie également les visées pour en déduire les valeurs les plus probables des angles. C'est Laplace qui, le premier, soumettra ces questions à une analyse mathématique rigoureuse dans sa *Théorie analytique des probabilités*, ouvrage paru en 1812 et c'est Gauss qui indiquera, en 1826, comment « compenser » les réseaux, c'est-à-dire comment minimiser les erreurs (un réseau est constitué par l'ensemble des points obtenus lors d'une triangulation. On en distingue de différents ordres, de 1 à 4, selon leur rapprochement).

Comme les sommets des triangles ne sont pas situés à la même hauteur, les triangles sont inclinés. Il est alors nécessaire de les ramener à l'horizontale en mesurant l'angle que fait chaque côté avec la verticale. C'est le *nivellement* qui peut s'effectuer à l'aide de mesures zénithales. On utilise également un *tachéomètre* qui, à l'origine, était un *théodolite* muni d'un *stadimètre*. Cet instrument d'optique, inventé par Paolo Ignazio Pietro Porro (Pignerol, 25 novembre 1801 - Milan, 8 octobre 1875), permet d'évaluer les angles mais, en plus, les distances par comparaison d'un objet de hauteur connue avec une échelle contenue dans l'instrument. Porro était major du Génie dans l'armée piémontaise. On lui doit également une nouvelle technique de mesure des bases ainsi que les prismes que l'on trouve dans les jumelles. Lors d'un séjour à Paris en 1852, il introduisit le téléobjectif en photographie en prenant une vue du Panthéon à un kilomètre de distance. Si la carte couvre une vaste zone, il est nécessaire de tenir compte de la forme de la Terre et il faut alors faire appel à la trigonométrie sphérique.

Enfin, il faut orienter la carte par rapport au Nord, c'est-à-dire qu'il faut mesurer l'angle, l'*azimut*, que les côtés font avec le méridien. Il s'agit de mesures astronomiques.

Les points de la triangulation doivent être répartis de façon la plus homogène possible afin, d'une part, de pouvoir servir à n'importe quelle utilisation ultérieure et, d'autre part, de faciliter la vérification des mesures. Dans chaque triangle, il est souvent possible de mesurer plus de deux angles et la longueur d'un côté. On peut ainsi se mettre à l'abri d'erreurs (instrumentales et de mesure) et augmenter la précision des résultats. De cette façon, on obtient des mesures surabondantes. Si les triangles faisant l'objet de ces mesures surabondantes ne se referment pas, on choisit pour chaque sommet le point qui correspond le mieux à

l'ensemble des mesures et l'on détermine les corrections à apporter aux angles mesurés ; c'est la *compensation* des réseaux. On obtient ainsi un système linéaire avec plus d'équations que d'inconnues (ou inversement selon les inconnues que l'on considère) et on le résout par la méthode des moindres carrés dont il a été question plus haut. C'est ainsi que le cartographe belge d'origine française Guillaume Adolphe Nerenburger (Amsterdam, 23 avril 1804 - Bruxelles, 19 mars 1869) eut à résoudre un système de 60 équations à 22 inconnues. Pour compenser ses réseaux, Bessel traita un système de 31 équations à 70 inconnues et Baeyer 47 puis 86 équations de condition. On se mit alors, pour traiter de tels systèmes, à rechercher des méthodes efficaces, rapides et faciles à utiliser sans formation mathématique poussée. Après un certain nombre de tentatives, la méthode de résolution qui s'imposa fut celle qu'André Louis Cholesky inventa en 1910. À l'heure actuelle, c'est toujours la plus utilisée pour résoudre de tels systèmes sur ordinateur. On en parlera plus loin.

Si l'on veut réaliser une carte plus précise, le réseau devra être affiné par des triangulations plus reserrées. À partir des premiers points mesurés (distants d'environ 50 km), on établit une triangulation interne plus précise, dite du second ordre (20 - 30 km), puis une triangulation du troisième ordre (5 - 10 km) et ainsi de suite jusqu'à obtenir la précision désirée pour les détails de la carte.

La densité des points doit être uniforme (c'est l'homogénéité) et aller de pair avec une bonne conformation des triangles. Les angles ne doivent être ni trop petits ni trop grands pour éviter des pertes de précision dans les mesures. Comme nous l'avons vu, la solution idéale est constituée de triangles tous équilatéraux ce qui est naturellement impossible à réaliser en pratique. Il faut cependant s'en approcher le plus possible. Les longueurs des différentes visées doivent être assez voisines les unes des autres et les mesures d'un même ordre doivent toutes être effectuées avec une précision comparable puisque qu'une erreur angulaire est multipliée par la longueur de la visée.

Les méthodes ont naturellement grandement évolué avec les développements techniques. La détection électromagnétique par radar (*radio detection and ranging*) a permis des mesures de distances plus longues et plus précises. Associées à des mesures d'angles, on peut ainsi localiser des objets fixes ou en mouvement. Le géodimètre, inventé en 1948 par l'ingénieur suédois Erik Östen Bergstrand (Uppsala, 3 juillet 1904 - Linköping, 28 avril 1987), est basé sur des ondes lumineuses stationnaires. Le telluromètre repose sur un principe analogue. Il est dû à

l'ingénieur sud-africain Trevor Lloyd Wadley (Durban, 1920 - Warner Beach, 21 mai 1981) en 1956. Ces deux appareils, d'un usage simple et rapide, permettent des mesures très précises des distances mais n'affranchissent cependant pas complètement le topographe des mesures angulaires.

Le nivellement

Le nivellement (ou altimétrie) consiste à mesurer l'altitude de points par rapport à une surface prise comme référence. Souvent, il s'agit du géoïde afin de pouvoir tracer des courbes de niveau. On ne mesure en fait que des différences de niveau entre deux points, en général repérés par des piquets plantés verticalement (les mires), situés de part et d'autre d'un appareil de visée parfaitement horizontal. L'opération ne peut donc se dérouler que sur une petite distance (il faut tenir compte des accidents de terrain et même de la végétation qui peut gêner les visées) et doit être répétée autant de fois que nécessaire. Il faut donc être particulièrement attentif à la précision de chaque visée et aux erreurs instrumentales. Mais de telles mesures ne fournissent pas la cote au-dessus du géoïde car la somme des dénivelées dépend du chemin suivi. Pour obtenir l'altitude au-dessus du géoïde, il est nécessaire de faire appel à la notion de *potentiel* du champ gravitationnel et d'effectuer la somme des produits de la dénivelée par la valeur de la pesanteur en partant d'un point d'altitude zéro, situé en France au marégraphe de Marseille.

Le nivellement des terrains immergés pose un problème particulier. En général, la surface de l'eau est prise comme plan de référence et la profondeur se mesure à l'aide d'une sonde constituée d'un fil à plomb. Cette technique s'applique facilement dans le cas d'un étang dont l'eau est presque immobile, mais elle présente de sérieuses difficultés pour les rivières dont le débit peut être fort et sujet à variations. Un appareil mis au point par Émile Jean Baptiste Belloc (Toulouse, 13 octobre 1841 - 1914), connu pour ses études hydrographiques des lacs des Pyrénées, facilite grandement ces mesures. Il est constitué d'un câble métallique et d'un cadran gradué et fut utilisé par Ludovic Gaurier (Bayon-sur-Gironde, 2 août 1875 - Pau, 16 septembre 1931), André Delebecque (Paris, 14 décembre 1861 - Genève, 1947) et d'autres pour sonder lacs et océans.

Les mesures de nivellement remontent à l'Antiquité. Le fil à plomb était l'instrument indispensable. L'Ancien Testament raconte que, face

à la menace du roi d'Assyrie Sennachérib (qui régna de 705 à 680 av. J.-C.), le roi de Juda Ezéchias (741 av. J.-C. - 688 av. J.-C.) décida de ≪ boucher les sources d'eau qui étaient hors la ville ≫ et ≪ fit l'étang et l'aqueduc, et amena les eaux dans la ville ≫. Il s'agit de l'aqueduc entièrement souterrain reliant la source de Gihon au bassin de Siloé, construit en 701 av. J.-C. à Jérusalem, pour alimenter la ville en eau en cas de siège. En forme de S, il est long de 512 mètres pour une dénivellation de 10 mètres. Vers 550 avant J.-C., l'architecte grec Eupalinos de Mégare construisit un tunnel de 1.036 mètres de long pour apporter l'eau depuis les montagnes jusqu'à la ville de Samos. Deux équipes de deux hommes progressaient l'une vers l'autre et l'exploit est qu'elles se soient rencontrées. Les Romains construisirent de nombreux autres aqueducs ainsi que des égouts, prouvant ainsi leur maîtrise des techniques de nivellement.

Le niveau utilisé par les Romains, le *chorobate*, était constitué par une poutre terminée en équerre et munie de fils à plomb aux extrémités et sur les côtés. Un canal y était creusé et l'eau devait y affleurer sur toute sa longueur pour que l'instrument soit horizontal. On lisait probablement la différence de niveau à l'aide de règles graduées fixées aux extrémités. C'est l'ancêtre du niveau à bulle qui date du milieu du XVIIe siècle et fut perfectionné par l'ingénieur Antoine Chézy (Châlons-en-Champagne, 1er septembre 1718 - Paris, 4 octobre 1798) à la fin du siècle suivant.

Le niveau à eau restera longtemps l'instrument privilégié, sinon unique, de nivellement. Il est constitué de deux tubes verticaux transparents, ouverts, et qui communiquent par un tube horizontal rigide. Il est rempli d'un liquide coloré et la ligne des deux affleurements indique l'horizontale. Le canal du Midi et celui de Briare, construits par Pierre Paul Riquet (Béziers ?, 29 juin 1604 ? - Toulouse, 1er octobre 1680) à partir de 1666, furent sans doute nivelés de cette manière. On se sert aussi du niveau à bulle qui est un tube de verre cylindrique, très légèrement cintré. Il contient un liquide qui ne le remplit pas entièrement, laissant ainsi apparaître une bulle d'air qui vient se placer entre deux repères gradués sur le verre au milieu de sa partie supérieure lorsque l'appareil est parfaitement horizontal. D'autres types de niveau existent également.

Mais le premier à vraiment maîtriser les techniques de nivellement est Jean Picard. Ses travaux sont exposés par son disciple Philippe de La Hire dans son *Traité du nivellement* paru en 1684. Le but est de montrer comment mesurer la différence de niveau entre les extrémités d'un canal.

La Hire fait mention d'une méthode de double nivellement réciproque de deux stations lorsqu'il est impossible de stationner entre elles, peut-être le prélude de la méthode de cheminement double que Cholesky mettra au point en 1910 lors de ses travaux en Afrique du Nord. Picard est également à l'origine du nivellement indirect qui consiste à utiliser les distances zénithales pour calculer la différence d'altitude entre deux points. La technique fut reprise par d'autres mais les résultats étaient médiocres. Cassini de Thury explique que c'est la réfraction atmosphérique qui empêche que les calculs soient exacts. Ce sera Delambre qui trouvera la correction à apporter. Cependant, à l'époque de la Méridienne, on ne disposait pas d'assez d'éléments pour mener une discussion scientifique satisfaisante sur la question. En effet, la dilatation des gaz parfaits ne sera étudiée que vers 1800 par Louis Joseph Gay-Lussac (Saint-Léonard de Noblat, 6 décembre 1778 - Paris, 9 mai 1850). La pesanteur n'étant pas la même à toutes les altitudes, on eut aussi recours à des mesures barométriques de nivellement. Entre 1729 et 1733, le géographe hollandais Nicolaus Samuelis Cruik, dit Cruquius (Vlieland, 2 décembre 1678 - Spaarndam, 5 février 1754), définit le lit de plusieurs rivières à l'aide de courbes « d'égale sonde » équidistantes. Philippe Buache (Paris, 7 février 1700 - Paris, 27 janvier 1773) utilise le même procédé en 1737 pour représenter les fonds de la Manche. Le 13 décembre 1749, un officier du Génie toulonnais, le chevalier Milet de Mureau, transmet au Ministre un *Mémoire pour faciliter les moyens de projeter dans les pays de montagne* dans lequel il a, le premier, l'idée du plan coté. Puis, en 1761, un ingénieur militaire, de Roche-Piquet, utilise des cotes d'altitude indiquant la distance à un même niveau, dans les plans de fortifications.

Mais les ingénieurs des Ponts et chaussées sont confrontés à des problèmes de terrassement qui prennent de plus en plus d'importance dans leurs projets. Le nivellement géométrique de précision est l'œuvre de Paul-Adrien Bourdaloue (Bourges, 4 janvier 1798 - Bourges, 21 juin 1868). Après avoir travaillé sur le nivellement des voies ferrées entre Nîmes et les mines des Cévennes, il fut chargé du nivellement de la zone du canal de Suez en 1847. Puis il procéda au nivellement de la France et mit en place, entre 1857 et 1863, un réseau de 15.000 repères en fonte scellés pour le tracé des courbes de niveau. Lorsque Bourdaloue atteignit Brest, on crut constater que le niveau de l'Océan était 1 mètre en dessous de celui de la Méditerranée. En 1879, le ministre des Travaux publics, Charles Louis de Saulces de Freynicet (Foix, 14 novembre

1828 - Paris, 14 mai 1923), ordonna donc qu'un nouveau nivellement général soit effectué. Il devait s'étendre sur 840.000 km avec des mailles de 1.300 m. Puis ce premier réseau devait être complété par des nivellements intermédiaires qui permettrait de tracer les courbes de niveau. Ce travail titanesque fut entrepris, à partir de 1884, sous la responsabilité d'une commission où siégeaient Charles Lallemand (Saint-Aubin-sur-Aire, 7 mars 1857 - Vecqueville, 1er février 1938), un ingénieur en chef des Mines qui deviendra, en 1893, directeur du Service du nivellement général et sera le supérieur hiérarchique de Cholesky, Marx, Goulier, dont il sera question ultérieurement, et Émile Cheysson (Nîmes, 18 mai 1836 - Leysin, Suisse, 7 février 1910), un ingénieur qui avait dirigé les usines Schneider du Creusot de 1871 à 1876 et qui, depuis 1877, était directeur des Cartes et plans et de la statistique graphique du ministère des Travaux publics. Lallemand, qui dirigeait les opérations, imagina un nouveau type de marégraphe, le *médimarémètre*. Il s'agissait d'un tube dont le fond était poreux et laissait filtrer lentement l'eau tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. L'amplitude des oscillations dues à la marée était ainsi considérablement réduite. Les oscillations présentaient un retard de phase car le fond poreux laissait filtrer l'eau plus lentement que la variation de niveau de la mer. Une tige graduée plongée dans le tube permettait de déterminer journellement le niveau, ce qui nécessitait la présence d'un opérateur. Ce médimarémètre fut mis en place en 1883 au numéro 174 de la corniche à Marseille, dans l'anse Calvo. Des mesures furent effectuées sans discontinuer du 1er janvier 1884 au 31 décembre 1896. Le 1er janvier 1897, la valeur moyenne de ces mesures servit à déterminer le niveau moyen de la mer en ce lieu, niveau moyen qui a ensuite été adopté comme altitude zéro en France. Le médimarémètre et son poste d'observation sont aujourd'hui classés monuments historiques. Chaque semaine, un technicien de l'Institut géographique national continue encore à entretenir le mécanisme et à prendre note des mesures.

Le développement total des lignes de ce nivellement général dépassera les 840.000 km prévus initiallement et, en 1900, 74.000 repères avaient été posés. Le nivellement du réseau du premier ordre (12.000 km) fut effectué de 1884 à 1891, celui du second ordre (14.300 km) de 1892 à 1898. Ceux du troisième et du quatrième ordre sont presque achevés à la déclaration de la guerre en 1914. Le réseau de 1er ordre du nivellement général de la France comprend 19 marégraphes et 11 médimarémètres. La marée est très faible en Méditerranée (8 à 10 cm) et très forte au mont Saint-Michel (13,50 m en vives eaux, 6 m en mortes eaux). Les plus fortes

marées du monde (19,6 m) se situent dans la baie de Fundy au Canada (voir http ://pagesperso-orange.fr/cadastre/lallemand.htm). Lors de ces mesures, on s'aperçut d'une différence de niveau entre la Méditerranée et l'Atlantique. Certains calculs donnaient 1 m 67 et d'autres 70 cm alors que le dénivelé réel est de l'ordre de 30 cm.

Vers la fin du XVIIIe siècle, Charles-François Beautemps-Beaupré (La Neuville-au-Pont, 6 août 1766 - Paris, 16 mars 1854), un ancien élève du Dépôt des cartes et plans de la marine, qui avait collaboré à la préparation de cartes que Lapérousse avait emportées dans son voyage puis était parti en 1791 pour cinq ans sur *La Recherche* avec l'amiral d'Entrecasteaux, préconise le dessin de paysage panoramique pour enregistrer les angles de différentes directions lorsque le terrain ne peut être parcouru. Mais il est le seul à utiliser ce procédé car il est peu pratique, les moyens d'établir rapidement et avec précision la perspective d'un paysage manquant alors totalement. Dès 1850, Aimé Laussedat (Moulins, 19 avril 1819 - Paris, 18 mars 1907), officier et professeur suppléant à l'École polytechnique, est l'un des pionniers français de la photogrammétrie, application de la photographie aux relevés topographiques et à la reconnaissance de formes. Il est, bien malgré lui, à l'origine de la fête de l'École polytechnique, le « Point Gamma ». En effet, il n'arrêtait pas de parler à ses élèves du point γ (le point vernal dont nous avons parlé dans le premier chapitre) et ceux-ci décidèrent ce célébrer ce jour ! Le procédé est ensuite développé, de 1863 à 1871, par le capitaine Javary, un élève de Laussedat. Appliqué à la cartographie au Canada et en Italie et à l'archéologie et au levé des fortifications en Allemagne, ce procédé ne rencontre que peu de faveur dans notre pays jusqu'au moment où Henri et Joseph Vallot s'en servent pour leur levé topographique du massif du Mont-Blanc à partir de 1892. Nous en reparlerons.

En 1858, le jeune architecte allemand Albrecht Meydenbauer (Tholey, 30 avril 1834 - Bad Godesberg, 15 novembre 1921) est chargé de mesurer et de relever les façades des bâtiments pour le service d'inventaire du patrimoine prussien. Mais, durant ce travail, il manque de tomber de la cathédrale. Plus question pour lui de se livrer à de périlleuses escalades ! Il décide donc de remplacer les mesures directes par des mesures indirectes utilisant la photographie. En 1867, alors qu'il a fabriqué pour cela ses propres instruments de mesure, il s'aperçoit que cette idée peut également servir en topographie. Il consulte les revues savantes et découvre les travaux de Laussedat. Fin décembre 1867, il publie en hâte

un article sur sa technique qu'il nomme photométrographie. Après la prise des clichés, se pose le problème de la restitution topographique du terrain photographié. C'est au cours d'un séjour en Perse, entre 1874 et 1881, que le philosophe, historien, géographe, mathématicien, physicien et ingénieur allemand Franz Stolze (Berlin, 14 mars 1836 - Berlin, 13 janvier 1910) a l'idée qu'un examen stéréoscopique permet une précision supérieure dans l'identification de points identiques entre différentes photographies ainsi qu'une meilleure appréciation de la forme du terrain. Les procédés de Laussedat sont améliorés en 1901 par l'opticien allemand Carl Pulfrich (Strässchen, 24 septembre 1858 - Ostsee, 12 août 1927) en se servant de deux photographies et de son *stéréo-comparateur*. Le capitaine autrichien Eduard Ritter von Orel (Trieste, Autriche, 5 novembre 1877 - Bozen, 24 octobre 1941) y ajoute en 1911 un mécanisme permettant le tracé continu des courbes de niveau et des détails observés sur les couples de photographies. Le redressement consiste à passer d'une photographie, qui n'est pas semblable au terrain à cause des variations d'échelle dues à l'inclinaison des prises de vue et du relief, à une représentation fidèle.

Les travaux sur ce sujet durèrent de nombreuses années. On trouva de nombreuses méthodes de redressement, qui sont maintenant toutes dépassées. Le premier à utiliser un tel procédé fut le capitaine autrichien Theodor Scheimpflug (Vienne, 7 octobre 1865 - 22 août 1911). En France, l'ingénieur géographe Henri Charles Clément Roussilhe (Versailles, 1879 - Carennac, 1945) inventa, en 1917, un appareil utilisé industriellement. Puis, en 1919, l'ingénieur Georges Poivilliers (Draché, Indre-et-Loire, 15 mai 1892 - Neuilly-sur-Seine, 9 mars 1968) construisit une machine qui restituait parfaitement le terrain à partir de vues stéréoscopiques prises d'avion. Le relais viendra, à partir de 1957, avec les satellites artificiels. Rappelons-nous que, pendant la Seconde Guerre mondiale, Antoine de Saint-Exupéry (Lyon, 29 juin 1900 - au large de Marseille, 31 juillet 1944) pilota un avion de reconnaissance aérienne. Il nous en a laissé le témoignage dans *Pilote de guerre*.

Mais toutes ces mesures doivent être constamment recommencées à cause des mouvements de l'écorce terrestre.

Le report du plan levé

Une fois le plan levé sur le terrain et avant de pouvoir véritablement dessiner la carte, il faut commencer par reporter sur papier les mesures (angles et longueurs) effectuées sur le terrain. Le premier travail est de fixer l'échelle de la carte. Si le levé a été uniquement effectué à la chaîne d'arpenteur, les angles sont inconnus et l'on reporte les longueurs des côtés des différents triangles en tenant compte de l'échelle. Si les angles sont connus, on peut utiliser un rapporteur. Une méthode plus précise consiste, sur la perpendiculaire au côté considéré du triangle, à prendre une longueur égale à la tangente de l'angle, longueur que l'on trouve dans une table. On peut aussi rechercher dans une table la valeur de la corde qui correspond à l'angle à tracer. Enfin, on peut utiliser les coordonnées des points à reporter sur des axes rectangulaires, sachant que la longueur de la projection d'un segment sur l'axe horizontal est égale à la longueur de ce segment multipliée par le cosinus de l'angle que sa direction fait avec l'axe. Ces calculs sont longs, mais ils doivent conduire à des résultats exacts. Il est également possible de faire appel à des coordonnées polaires lorsque le levé a été effectué par rayonnement à partir d'un point.

Bien entendu, il est souvent impossible de reporter ces mesures avec toutes la précision voulue, si bien que les triangles ou les polygones ne se referment pas exactement. On cherche alors à minimiser la somme du carré des erreurs. Mathématiquement, cela conduit à la résolution d'un système d'équations linéaires au sens des moindres carrés. C'est à ce problème que Cholesky fut confronté et c'est pour le résoudre, qu'en 1910, il imagina une méthode numérique qui est toujours d'usage de nos jours, non seulement en topographie mais dans de nombreux autres domaines des mathématiques appliquées (sur internet, plus de 300.000 sites se réfèrent à Cholesky !). Si les erreurs sont trop importantes, il est alors nécessaire de recommencer les constructions graphiques et même, dans certains cas extrêmes, les mesures sur le terrain. Mais, il faut également être certain que tous les périmètres se referment effectivement, ce qui peut ne pas être le cas, par exemple, pour une route sinueuse de montagne où des passages sont topographiquement voisins les uns des autres, mais ne sont pas situés à la même altitude.

Après report, un plan se doit d'être vérifié. La meilleure vérification consiste à faire un nouveau levé sur le terrain. Mais, comme cela double le temps de travail, on ne vérifie que les mesures les plus importantes et

on l'effectue simultanément au premier levé. Si une erreur est trouvée, il faut immédiatement en rechercher la cause. On ne peut compter sur l'exactitude d'un plan que si ces vérifications ont été effectuées.

Naturellement, de nos jours, toutes ces opérations ne se font plus à la main, mais sont automatisées.

La cartographie

L'arpentage et la confection de cadastres sont très anciens. Les monuments chaldéens et égyptiens en fournissent des documents. Mais les procédés utilisés alors étaient fort rudimentaires. Il faut attendre une époque relativement récente pour que des méthodes scientifiques apparaissent. Nous allons retracer ce cheminement historique.

Il semble que le créateur du mot cartographie soit Manuel Francisco Mesquita de Macedo Leitão e Carvalhosa, vicomte de Santarém (Lisbonne, 18 novembre 1791 - Paris, 17 janvier 1855). Dans une lettre envoyée de Paris à l'historien et diplomate Franscisco Adolfo de Varnhagen (1816 - 1878), en 1839, il écrit *j'invente ce mot puisque tant d'autres ont été inventés là*. Fils d'un valet de chambre du roi Jean VI de Portugal (1767 - 1826) qui l'avait anobli, il était entré dans la diplomatie, puis avait été nommé ambassadeur à Copenhague avant d'être rappelé après la révolution libérale de 1820. Directeur général des archives d'État lors de la victoire du parti absolutiste (1824), il fut nommé ministre de l'Intérieur par la régente Isabelle-Marie en 1827, et prépara le retour de dom Miguel, qui lui confia le portefeuille des Affaires étrangères (1828-1832). La victoire de dom Pedro et de la reine Maria le décida à vivre à Paris à partir de 1834, où il s'occupa d'histoire et de géographie. Il publia de nombreux ouvrages sur les explorations portugaises dans lesquels, par patriotisme, il exagéra souvent l'importance des découvertes de ses compatriotes. On lui doit un *Essai sur l'histoire de la cosmographie et de la cartographie pendant le Moyen Âge et sur les progrès de la géographie après les grandes découvertes du XVe siècle : pour servir d'introduction et d'explication à l'atlas composé de mappemondes et de portulans, et d'autres monuments géographiques, depuis le VIe siècle de notre ère jusqu'au XVIIIe*, en trois volumes, paru à Paris, Imprimerie Maulde et Renou, 1849-1852.

L'Antiquité

Les plus anciennes cartes ont été réalisées par les Babyloniens en 2300 avant J.-C. Elles étaient tracées sur des carreaux d'argile et concernaient des levés de propriétés foncières en vue du paiement des impôts. En 1930, on a trouvé près de Kirkouk en Irak (dans l'ancienne Assyrie) une carte représentant une région avec ses montagnes, ses rivières et ses villages ainsi que des inscriptions explicatives dont les directions de l'est et de l'ouest. On conserve à Turin un papyrus polychrome datant de 1200 à 1100 avant J.-C. où le Nil est figuré ainsi qu'une route avec points d'eau et mines. Elle devait servir au transport des blocs de pierre.

En Chine, on a retrouvé une carte gravée sur un ustensile de cuisine qui date d'environ 2100 av. J.-C. On a aussi retrouvé, dans une tombe, une carte d'un cimetière réalisée entre 323 et 15 av. J.-C. Des cartes régionales existaient au IIe siècle avant J.-C. ; elles étaient dessinées sur de la soie et commencèrent à se répandre à partir de la dynastie des Han occidentaux, entre 206 av. J.-C. et 9 ap. J.-C.

Des cartes marines, composées d'un treillis de fibres de cannes, furent réalisées par les habitants de îles Marshall, dans le sud du Pacifique. Les civilisations mayas et incas connaissaient bien l'art de la cartographie. Dans une église orthodoxe de Madaba, en Jordanie, on a découvert en 1896 les fragments d'une mosaïque datant des années 560-565, exécutée d'après le journal de voyage d'un pèlerin chrétien. Elle devait mesurer 15,70 m sur 5,60 m et rassembler plus de deux millions de tesselles. On y reconnaît les routes romaines locales, des cités romaines avec leurs noms en grec, Jérusalem, la mer Rouge, la mer Morte, le delta du Nil, la côte méditerranéenne et les montagnes de Damarie et de Judée. Elle s'étend de Byblos et Damas jusqu'au mont Sinaï et à Thèbes et est composée avec réalisme - on y voit une forteresse isolée au sommet d'une montagne - ce qui en fait une source iconographique précieuse.

L'une des premières cartes du monde aurait été réalisée par Anaximandre de Milet (Milet, ca. 610 - ca. 547 av. J.-C.). Elle a disparu mais nous en avons une idée grâce à des commentaires d'Aristote (Stagirus, 384 av. J.-C. - Chalcis, 322 av. J.-C.). La Terre y était figurée comme un cercle divisé en un certain nombre de figures simples et toutes les terres connues alors y étaient représentées. Le centre était occupé par la mer Égée et la périphérie par l'océan. Cette représentation connaîtra un vif succès, mais elle fut cependant vite critiquée, en particulier par

Hérodote (ca. 484 av. J.-C. - ca. 420 av. J.-C.) qui écrit dans son ouvrage *Histoire, IV, 36*

> *Je ris quand je vois que beaucoup déjà ont dessiné des images d'ensemble de la Terre, sans qu'aucun d'eux en ait donné un compte rendu raisonnable ; ils représentent l'océan enveloppant de son cours la Terre, qui serait toute ronde, comme si elle était faite au tour.*

Dicéarque de Messine (347 av. J.-C. - 285 av. J.-C.), un élève d'Aristote, situe les points connus par rapport à deux axes passant par Rhodes : le *diaphragme*, orienté est-ouest, et la *perpendiculaire*. C'est lui qui, le premier, localisa un parallèle en recensant les villes situées à la même latitude de Gibraltar à la Perse.

Dans *De re publica* et dans *Tusculanae disputationes*, Cicéron (Arpinum, Latium, 3 janvier 106 av. J.-C. - Formia, Latium, 7 décembre 43 av. J.-C) raconte, qu'après le siège et le pillage de Syracuse, pendant lequel Archimède (Syracuse, 287 av. J.-C. - Syracuse, 212 av. J.-C.) avait été tué par un soldat romain, le consul Marcellus avait emporté à Rome un globe céleste et un planétarium construits par Archimède. Le planétarium montrait à chaque rotation, la Lune qui se levait après le Soleil, les éclipses de Lune et de Soleil aux intervalles de temps exacts et les cinq autres planètes connues : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Cependant, en 1975, l'historien de l'astronomie, Otto Eduard Neugebauer (Innsbruck, 26 mai 1899 - Princeton, 19 février 1990) émit des doutes sur les dires de Cicéron car, selon lui, aucun mécanisme ne pouvait combiner l'ensemble de ces mouvements. Les sources antiques mentionnent un autre globe, celui de Cratès de Mallos, vers 170 av. J.-C.

La carte d'Ératosthène, aux environs de 200 ans avant J.-C., s'étend de Gibraltar à l'ouest jusqu'à l'embouchure du Gange à l'est et la Libye au sud. C'est la première carte où les latitudes sont figurées sous forme de lignes parallèles. Elle comporte également plusieurs méridiens, espacés irrégulièrement. Le but de la géographie (terme qu'il utilise) est de cartographier le monde habité, l'œcoumène. Les premiers documents relatant l'utilisation de méthodes trigonométriques datent des travaux astronomiques d'Aristarque de Samos (Samos, ca. 310 av. J.-C. - 230 av. J.-C.) dans la première moitié du troisième siècle avant notre ère. Il fut le premier à oser penser que la Terre n'était peut-être pas le centre du Monde, mais tournait autour du Soleil. Ce fut Hipparque qui, le premier, insista sur l'utilisation de l'astronomie pour la mesure des longitudes par

différence des heures locales d'une même éclipse de Lune. Il systématisa la cartographie en imaginant des systèmes de projection. On le considère souvent comme l'inventeur de la trigonométrie. Il fut très critique sur l'œuvre d'Ératosthène et remplaça ses parallèles et ses méridiens qui passaient par des lieux connus par des droites équidistantes. En les numérotant, on pouvait repérer tout point à la surface de la Terre. Les Grecs essayèrent ainsi d'avoir une vision d'ensemble du monde connu comme dans la figure du globe de Cratès vers 150 av. J.-C. Tout ceci illustre bien la différence entre la géographie purement descriptive et non scientifique de la Grèce classique et la géographie mathématique qui lui succéda.

Le premier à avoir été confronté au problème de la représentation plane de la Terre fut Claude Ptolémée dans son ouvrage *La géographie* où il donne plusieurs cartes du monde plus ou moins détaillées. Pour les cartes à grande échelle, les méridiens et les parallèles sont des droites équidistantes se coupant à angle droit, comme dans les travaux de Marin de Tyr qu'il cite amplement, analyse et reprend. Pour celles à petite échelle, il décrit deux possibilités de projection. D'abord, il utilise un cône de même axe que la Terre et qui la coupe au 63e parallèle (celui où il plaçait la mythique Thulé) et à l'équateur. Les méridiens sont les génératrices du cône et les parallèles sont ses cercles de base, donc centrés au sommet du cône. Mais il n'est pas satisfait de cette représentation : les méridiens sont cassés au niveau de l'équateur et les longueurs ne sont pas respectées sur les parallèles. Il invente donc une projection conique arrondie. Seul le méridien central, celui de Rhodes et de Syène, est une droite. Les parallèles sont des arcs de cercles concentriques, dont les longueurs sont proportionnelles aux longueurs réelles et dont il faut déterminer les centres. Cette représentation conserve les rapports entre les aires. Bien entendu, à cause des erreurs de mesure et des simplifications apportées dans les calculs (dont $\pi = 3$), ses cartes ne sont pas fidèles. Par exemple, l'Eurasie est beaucoup trop importante par rapport au reste du monde. Cependant, il est le premier à aborder scientifiquement la cartographie.

L'œuvre de Ptolémée est constituée de huit parties. La dernière contient des instructions pour établir des cartes. Les principaux lieux sont accompagnés de leurs coordonnées. Huit mille points proviennent d'itinéraires de voyage et trois cent cinquante sont déterminés astronomiquement. Ainsi, toutes les notions fondamentales de la cartographie avaient été établies par les Grecs. Les travaux de Ptolémée sont mentionnés par

le mathématicien Pappus d'Alexandrie vers l'an 300. Dans son *Périple de la mer extérieure*, vers 550, Marcianus d'Héraclée se base sur Ptolémée.

À l'autre bout de la planète, et à la même époque, Chang-Hen (Nanyang, province du Henan, 78 - 139) est le premier chinois à construire un globe céleste rotatif. Selon lui, l'univers est comme un œuf avec les étoiles sur la coquille et la Terre à la place du jaune. Il invente l'odomètre ainsi qu'un appareil qui préfigure le sismographe. Il s'agit d'une jarre en porcelaine qui, lors d'un séisme, libère une bille par l'une de ses huit ouvertures, indiquant ainsi la direction de la secousse et, donc, de l'épicentre. Il publie aussi un résumé des théories astronomiques de son temps et fournit une approximation de π par la fraction 730/232 ($\simeq 3,1466$). Dans l'une de ses formules pour le calcul du volume sphérique, il utilise cette approximation comme racine carrée de $10 \simeq 3,162$. La première *Carte de la Chine et des pays barbares à l'intérieur des terres*, en dix-huit feuillets, sera élaborée en 267 par Phei-Hsui, un ministre de la dynastie des Chin, qui écrit

> *Maintenant, dans les archives secrètes, on ne possède plus les cartes géographiques de l'antiquité... on possède seulement de la dynastie Han des cartes générales, ainsi que diverses cartes locales. Aucune de ces cartes ne se sert de divisions rectilignes, aucune non plus ne détermine l'orientation exacte... Parfois il s'y trouve des propos absurdes, étrangers au sujet ou exagérés, qui ne s'accordent point avec la réalité des choses et que le bon sens ne saurait admettre. L'avènement de la grande dynastie Chin a unifié tout l'espace dans les six directions.*

Cette carte, qui ne prend pas en compte la rotondité de la Terre pour la bonne raison que les Chinois la croient plate et carrée, utilise un système de quadrillage et de projection orthogonale qui remonte à Chang-Hen, mais qu'elle exploite à fond. Une grille rectangulaire indique ainsi, avec une bonne approximation, les coordonnées de tout point du territoire chinois et permet de s'orienter. Il manquait cependant à la cartographie chinoise le cadre théorique que les Grecs avaient su imaginer. La Chine ne joua jamais un rôle déterminant dans l'histoire mondiale de la cartographie.

Les Romains ne firent pas progresser la cartographie. Ils ne se servaient de cartes que dans un but militaire et pour l'administration de leur

empire. Chez les historiens antiques, la géographie n'a souvent qu'une place très mineure. Ils insistent souvent sur l'importance du paysage, qui n'est pas seulement décoratif, mais est associé à une opération militaire parce qu'il a un rôle stratégique essentiel. Ainsi, l'historien Polybe (Megalopolis, Arcadie, 210-202 av. J.-C. - 126 av. J.-C.) écrit-il : *Il ne faut pas négliger de décrire le cadre topographique de n'importe quelle action et encore moins lorsqu'il s'agit d'opérations militaires.* Dans la plupart des cas, les montagnes sont décrites dans l'introduction d'un récit, ou à l'occasion d'une conquête ou encore pour expliquer le déroulement d'une bataille (Salluste, César, Tacite), un parcours difficile de l'armée et la valeur de son commandant (Tite-Live, Silius Italicus, Claudien pour les Alpes, Quinte-Curce, Arrien pour Alexandre en Perse, Dion Cassius, Appien, Plutarque, pour divers massifs ou fleuves), soit pour raconter un acte important d'un empereur (Suétone). Plus rares sont les véritables descriptions géographiques.

Deux cartes murales semblent avoir existé à Rome, une signalée en 40 av. J.C. par le très prolifique écrivain romain Terrentius Varro (116 av. J.-C. - 27 av. J.-C.) et l'autre due à Agrippa et dont nous reparlerons plus loin à l'occasion de la *Table de Peutinger*.

C'est grâce à Strabon (Amasée, Cappadoce, ca. 57 av. J.-C. - ca. 23 ap. J.-C.) que nous connaissons les œuvres de ses prédécesseurs. Sa *Géographie*, écrite en grec et composée de dix-sept livres, est l'unique vestige de cartographie antique qui nous soit parvenu. C'est par son intermédiaire que avons aujourd'hui connaissance des écrits des Grecs, Eratosthène, Polybe, Artémidore, Posidonius, Apollodore d'Artémita, Démétrius de Scepsis et Apollodore d'Athènes, qu'il a su améliorer en y intégrant les écrits, malheureusement disparus, conservés dans la bibliothèque d'Alexandrie. De plus, Strabon était un grand voyageur. Il visita l'Asie mineure, l'Arménie, la Sardaigne, l'Égypte, Corinthe, Cyrène, l'Italie et en ramena donc des descriptions fiables et détaillées.

Dans son traité d'architecture, Marcus Vitruvius Pollio, que nous appelons Vitruve (ca. 90 av. J.-C. - ca. 20 av. J.-C.), donne quelques descriptions ponctuelles de géographie physique. On pense qu'il l'écrivit avec une carte sous les yeux.

Pline l'Ancien (Côme, 23 - Stabies, 79 lors de l'éruption du Vésuve) a écrit en latin une immense *Histoire naturelle*, sorte d'encyclopédie. Les livres II à VI sont consacrés à la géographie et nous apportent beaucoup d'informations sur les paysages de l'Empire et hors de l'Empire car il a été amiral de la flotte romaine.

Les arpenteurs romains, les *agrimensores*, ont laissé des traités pédagogiques sur la division des terres, leur organisation et leur statut juridique selon leur type. Parmi eux, il faut citer Frontin (ca. 41 - ca. 103), Hyginus Gromaticus (ca. 75 ap. J.-C.), Caius Junius Hyginus (67 av. J.-C. - 17 ap. J.-C.), Mensor Balbus (sous Trajan, Ier siècle), Siculus Flaccus (que l'on a du mal à dater) et Agennius Urbicus (règne de Domitien, fin du Ier siècle). L'*Itinéraire d'Antonin* est une énumération de lieux le long des routes de l'Empire avec des indications sur les distances. Il a sans doute été réalisé à partir d'une carte murale. On peut penser qu'il a repris un document datant de Caracalla (début IIIe siècle), mais certains éléments datent de la fin du IIIe siècle car la ville de Constantinople y est mentionnée. Il est peut-être issu d'une enquête demandée par Jules César (Rome, ca. 100 av. J.-C. - Rome, 15 mars 44 av. J.-C.) et menée à bien par son neveu et fils adoptif Auguste (23 septembre 63 av. J.-C. - 19 août 14 ap. J.-C.). Une autre source est constituée des gobelets de Vicarello, des objets votifs de l'époque d'Auguste provenant de la station thermale d'*Aquae Apollinares* près du lac de Bracciano, où sont gravées des étapes d'un itinéraire de Rome à Cadix, et l'*Itinéraire de Bordeaux à Jérusalem*, qui date du règne de Constantin (333-335) qui est un guide routier pour les pèlerins. Ces itinéraires font indéniablement penser à la *Table de Peutinger*.

Le géographe et voyageur Pausanias (Magnésie du Sipyle, Lydie, ca. 115 - Rome, ca. 180) écrit en grec une *Périégèse de la Grèce*, sous forme de carnet de voyage. Il est très précis sur les paysages grecs, et son livre VIII sur l'Arcadie est très riche sur la toponymie montagnarde, les routes et les villes. Il cite les montagnes traversées par des routes importantes et informe parfois sur les particularités du chemin à parcourir.

Pomponius Mela, au milieu du Ier siècle, écrit une chorographie, *De situ orbis*, et fait le tour de l'œcoumène, c'est-à-dire du monde connu. Son œuvre décrit surtout les îles, les rivages et les mers. Puis vint Ptolémée, déjà largement évoqué.

Au deuxième siècle, Dionysius Periegetes (Denys le Périégète ou d'Alexandrie) écrit, en hexamètres, un traité mêlant géographie et mythologie. On ne connaît pas son titre exact et on l'appelle simplement *Périégèse du monde habité*. C'est un ouvrage pour les écoliers mais il sera l'une des sources importantes de géographie au Moyen Âge et sera traduit en latin par Rufus Festus Avienus au IVe siècle. Dans son ouvrage *Polyhistor*, Caius Julius Solinus, au IIIe siècle, reprend parfois mot pour mot mais en abrégé, l'encyclopédie de Pline, sans toutefois le citer.

Au IVe ou au Ve siècle, le géographe Vibius Sequester édite une liste alphabétique, parfois avec des erreurs, des connaissances de ses prédécesseurs. Il donne de nombreux noms pour l'Italie, la Sicile et la région de Dyrrachium. L'historien et géographe Ammianus Marcellinus (Ammien-Marcellin, Antioche, ca. 330-335 - Rome ?, ca. 395-400) compile de nombreuses sources (Festus, Ptolémée, Timagène, Solin), mais, ayant aussi été officier dans l'armée de l'empereur Julien, il donne des détails issus d'expériences personnelles, par exemple sur le passage des Alpes par le col du Montgenèvre ou sur les marges de Perse. Paulus Orosius (Tarragone ou La Corogne, ca. 380 - 418), un prêtre de Braga au nord du Portugal, fait de grandes digressions géographiques dans son *Histoire contre les païens.* Il cite des noms de montagnes plus qu'il ne décrit le paysage, parce que les massifs lui servent de points de repère. Il est probable qu'il a alors une carte sous les yeux. Il cite les montagnes les plus connues par les Romains (Caucase, Alpes, Pyrénées, Rhipées, Olympe), mais n'en cite pas d'autres tout aussi importantes (mont Liban, montagnes de Grèce). Enfin, il faut mentionner la *Notitia Dignitatum* (380-400), à fonction administrative, qui fournit une liste de cités.

Un moine anonyme de Ravenne, dernière capitale de l'Empire d'Occident, réalisa vers l'an 700 la *Cosmographie de Ravenne* qui regroupait plus de cinq mille noms de lieux à travers l'Empire romain. Il est probable qu'il se servit de nombreuses cartes officielles. D'autres manuscrits antérieurs ont également été produits à Ravenne. Ensuite, on possède le *Palatinus Vaticanus Latinus*, avec 303 illustrations, qui date de 810-830, a été rédigé en Basse-Rhénanie et se trouve à la Bibliothèque Vaticane, le *Gudianus*, avec 305 illustrations, copie d'une copie du *Palatinus*, qui date de 850-875, à Wolfenbüttel, le *Laurentianus* de Florence, texte originaire de Basse-Rhénanie et datant de 800 environ, un fragment de manuscrit datant du Xe siècle qui est conservé à Berlin, la quatrième partie de l'*Erfurtensis*, conservé à Erfurt en Allemagne, qui date du XI-XIIe siècle et enfin le *Scriuerianus/Nansianus*, du XIIe siècle, qui se trouve à la British Library de Londres.

La plupart des informations concernant les géographes romains sont tirées du site http ://terra.antiqua.free.fr/

Des bribes de *La géographie* de Ptolémée se retrouvent dans deux compilations géographiques byzantines anonymes du IXe siècle. C'est à cette époque qu'elle est traduite en arabe. Au douzième siècle, elle réapparaît dans les *Chiliades* (les milliers) de Johannes Tzetzes (Cons-

tantinople, ca. 1110 - Constantinople, 1180), un poète et grammairien byzantin de Constantinople. Mais presque toutes les connaissances grecques avaient disparu d'Europe après la chute de l'Empire romain au milieu du Ve siècle.

La Table de Peutinger

Les préoccupations des Romains étaient centrées sur les itinéraires terrestres. C'est exactement ce que propose la carte connue sous le nom de *Table de Peutinger*. Elle fut retrouvée en 1494 *quelque part dans une bibliothèque* à Worms en Allemagne par Konrad Bickel, ou Celtis (Wipfeld-bei-Schweinfurt près de Würzburg, 1er février 1549 - Vienne, 4 février 1508), qui latinisa son nom en Protucius. Cette bibliothèque pourrait être celle du monastère impérial de Reichenau situé sur une île de l'extension ouest du lac de Constance. Fils de vigneron, ne voulant pas succéder à son père, Celtis étudie à Cologne puis part pour Heidelberg où Johann von Dalberg (Oppenheim, 14 août 1455 - Heidelberg, 27 juillet 1503), qui deviendra Évêque de Worms, le prend sous sa protection. Puis Celtis mène la vie errante des humanistes de cette époque, visitant de nombreux pays européens et rencontrant de nombreux érudits dans différentes universités. Il fonde plusieurs sociétés littéraires, à Cracovie, en Hongrie, à Vienne et en Allemagne. Il édite Sénèque et Tacite. Il publie des poésies et un *Ars versificandi et carminum*. À son retour, en 1491, il reçoit la couronne poétique des mains de l'Empereur Frédéric III du Saint-Empire (Innsbruck, 21 septembre 1415 - Linz, 19 août 1493). Son fils, l'Empereur Maximilien Ier de Habsbourg (Vienne, 22 mars 1459 - Wels, 12 janvier 1519) le nomme professeur d'éloquence à l'université de Vienne, en fait son bibliothécaire et l'envoie, à travers l'Empire, à la recherche de documents concernant l'histoire du pays.

En 1502, Celtis prend la direction du nouveau *Collegium poetarum et mathematicorum*. Il introduit de nouvelles méthodes d'enseignement et encourage l'étude des classiques, grecs en particulier. Il s'intéresse à l'histoire et à la topographie. Il redécouvre et fait publier les œuvres en latin de la poétesse et chanoinesse allemande Hrotsvita de Gandersheim (ca. 930-935 - Après 973). Il entreprend la publication d'une encyclopédie, la *Germania illustrata*, qui cherche à rattacher toutes les connaissances scientifiques de son temps à l'histoire de l'Allemagne. Il en rédige lui-même la partie *Germania generalis* (1500) et l'article sur Nuremberg *De origine, situ, moribus et institutis Norimbergae libellus* (1502). Celtis est

le plus grand poète de son temps en Allemagne. Par testament, il lègue la *Table de Peutinger* à Konrad Peutinger (Augsbourg, 14 ou 15 octobre 1465 - Augsbourg, 28 décembre 1547), chancellier d'Augsbourg.

Peutinger est un humaniste, issu d'une famille patricienne d'Augsbourg. Il est le fils de Konrad Peutinger et de Barbe Frickinger. Sa famille, originaire de Bavière, avait porté le nom de Peutingau qui provenait d'un fief qu'elle possédait près de la ville de Schongau sur le Lech. Un des ancêtres, Conrad de Peutingau, était allé s'établir à Augsbourg en 1288. Le nom se changea peu à peu en Peutingaver puis, par abréviation, en Peutinger.

Le Konrad Peutinger qui nous intéresse fait d'abord ses études en Allemagne, puis il est envoyé en Italie, à Bologne, sans doute à Rome, et à Padoue où, en 1486, il étudie le droit. Revenu chez lui, il devient secrétaire de sa ville et conseiller de l'empereur d'Autriche qui lui confie de fréquentes missions diplomatiques. Il prend part aux négociations entre Maximilien et les Hongrois qui se sont rebellés contre lui. En 1496, il est député à la Diète de Lindau et, trois ans plus tard, à celle d'Eflingen. En 1501, il est présent aux funérailles de la Princesse Marguerite, épouse de l'Électeur palatin. Il remplit différentes missions importantes pour l'Empereur et la ville d'Augsbourg. Nommé conseiller, il sert d'intermédiaire entre l'Empereur et la République de Venise en 1512. Après la mort de Maximilien en 1519, Peutinger continue à servir sous Charles Quint qu'il va rencontrer à Bruges et qui lui confirme son titre de conseiller. En 1521, il représente sa ville natale à la Diète de Worms. Son attitude envers Luther est d'abord favorable, mais il refuse de rompre avec l'Église et maintient une attitude conservatrice qui lui vaut la défaveur des Réformistes. À la Diète d'Augsbourg en 1530, il présente la protestation de sa ville aux décrets impériaux mais quand, en 1534, on veut effectuer des innovations sans tenir compte des désirs du clergé catholique, Peutinger s'y oppose et affirme sa croyance en la restauration de l'unité de l'Église par un concile. Son conseil n'est pas suivi ; il se retire avec une pension et se dévoue dès lors à ses études. Il collectionne les monnaies, les manuscrits anciens et les vieux livres. Il posséde la plus vaste bibliothèque privée au nord des Alpes et est en correspondance avec Érasme (Rotterdam, 1466 ou 1469 - Bâle, 12 juillet 1536), le jurisconsulte et écrivain Andrea Alciato (Alzate Brianza, 8 mai 1492 - Pavie, 12 janvier 1550), l'éditeur, écrivain et avocat Beatus Rhenanus (Sélestat, 22 août 1485 - Strasbourg, 20 juillet 1547) et d'autres humanistes contemporains. Il publie, en 1505, le premier cata-

logue imprimé d'inscriptions romaines. On lui doit également un autre ouvrage sur les Romains dans lequel il discute des anciennes frontières entre la Gaule et l'Allemagne. Il édite aussi d'importantes sources sur l'histoire germanique. Il s'était marié, le 20 novembre 1498, avec Margareta Welser (18 mars 1481 - 7 septembre 1552), elle-même une lettrée, qui appartenait à l'une des plus riches familles allemandes. Elle était la fille d'Antoine Welser qui commandait la place de Memmingen. Ils eurent dix enfants, six filles et quatre garçons. À l'âge de 4 ans, leur fille Juliana était capable de faire un discours en latin que son père, peu fier, reproduisit dans son livre sur les antiquités d'Augsbourg. En 1538, Peutinger est nommé patricien et est anobli quelques années avant son décès, le 28 décembre 1547.

Selon le testament de Bickel, Peutinger avait l'obligation de publier la fameuse Table. Il l'interprétait comme une copie médiévale d'une carte romaine qu'il pensait être l'*Itinéraire d'Antonin*, document qui semblait remonter à l'époque de César et serait dû à Ammianus Marcellinus. Il s'agit d'un guide de voyage de la Rome antique qui recense les villes-étapes de l'Empire romain et les distances qui les séparent. Selon d'autres opinions, cette carte date du règne de Théodose-le-Grand vers 393. Mais Peutinger ne put mener le projet à terme. Il avait tellement bien caché son précieux manuscrit que, quand il mourut en 1547, on mit quarante ans à le retrouver dans les tréfonds de son immense bibliothèque. Marcus Welser (Augsbourg, 20 juin 1558 - Augsbourg, 23 juin 1614), l'un des parents de sa femme et maire d'Augsbourg, n'en retrouva d'abord que deux fragments et voulut aussitôt les publier. Ils les recopia de sa main avec une exactitude scrupuleuse, sans en excepter les fautes, et confia sa copie à Alde Manuce (1449, Bassiano, 1449 - Venise, 6 février 1515), son intime ami, célèbre libraire de Venise, pour la publier sous le titre *Fragmenta Tabulae antiquae in quis aliquot per Rom. provincias itinera, ex Peutingerorum bibliotheca* en 1591. Ayant fini par découvrir le manuscrit original dans une caisse fermée, Welser confia à Abraham Ortelius (Anvers, 14 avril 1527 - Anvers, 4 juillet 1598) le soin de faire paraître la table dans sa totalité. Un dessin exécuté par Johannes Moller, qui réduisait de moitié les dimensions de l'original, lui fut remis. Mais la mort empêcha Ortelius de terminer son travail. Son œuvre fut poursuivie par l'imprimeur Johannes Moerentorf, latinisé en Moretus (Anvers, 2 mai 1543 - 1610), gendre et successeur de Christophe Plantin (Saint-Avertin, 1519 ou 1520 - Anvers, 1589), et la première édition, tirée à deux cent cinquante exemplaires, fut publiée à Anvers en décembre

1598. De très nombreuses éditions suivront. Elles sont toutes conformes à l'original, à l'exception du caractère lombard, auquel on a substitué le caractère romain, plus simple pour les typographes. Nicolas Bergier (Reims, 1er mars 1567 - Château de Grignon, 18 août 1623), historien, homme de lettres et professeur à la Faculté de droit de l'université de Reims, est auteur de la seconde édition parue en 1622 dans son livre *Histoire des grands chemins de l'Empire romain* et l'historien et géographe Georges Horn (Principauté de Schwarzburg, 1620 - 1670) de la troisième à l'occasion de son ouvrage *Accuratissima orbis antiqui delineatio* en 1652.

La magnifique collection de monnaies, de manuscrits et d'inscriptions romaines (dont il décorait les murs de sa cour) de Konrad Peutinger resta dans sa famille jusqu'en 1714 lorsque le dernier descendant, Didier-Ignace Peutinger, doyen de l'église d'Ellwangen, en fit don aux Jésuites d'Augsbourg. Après la suppression de cet ordre, elle revint à la bibliothèque de la ville. Wolfgang Jacques Sulzer, un graveur d'Augsbourg retrouva la Table en 1714 en examinant avec soin les manuscrits de la bibliothèque de Peutinger. Paul Kuhsius, un libraire d'Augsbourg, l'acheta aussitôt à Ignace Peutinger.

Au fil des ans, le prince Eugène de Savoie-Carignan (Paris, 18 octobre 1663 - Vienne, 24 avril 1736) s'était constitué une magnifique bibliothèque qui ne comportait pas moins de 15.000 volumes imprimés, dont les onze volumes de l'*Atlas Major* de Johannes Blaeu de 1662, 237 incunables et un nombre considérable de manuscrits, de plans et de cartes. On peut l'admirer à la *Hofburg* de Vienne. Le 20 septembre 1717, à quelques heures de donner l'assaut à l'armée ottomane près de Semlin (ou Zemun, première ville de Hongrie, en face de Belgrade sur l'autre rive du Danube), le prince Eugène envoie la lettre suivante à Karl Gustav Heraeus (Stockholm, 1671 - Veitsch, 6 novembre 1725 ou 1730), un numismate et antiquaire, inspecteur des antiquités de l'Empereur romain germanique Charles VI de Habsbourg (Vienne, 1er octobre 1685 - Vienne, 20 octobre 1740),

> *Je vous suis bien obligé pour l'avis que vous me donnez que les Tabula Peutingeriana de Théodose en original écrites sur le vélin se trouvent à vendre à Augsburgi comme vous scavez que ces sortes d'ouvrages doivent être examinées par un connaisseur. Je tacheray de trouver quelqu'un pour les reconnaitre sur le lieu, et donneray ensuite la résolution sur*

le prix. Je vous suis très parfaitement, Monsieur, votre très obligé

Eugène de Savoye
au camp de Semlin, 20 septembre 1717

La Table de Peutinger fut achetée pour cent ducas par le Prince qui en fit don à la bibliothèque de Vienne (Österreichische Nationalbibliothek) où elle se trouve toujours (*Codex Vindobonensis 324*). C'est sur ce document authentique qu'est basée l'édition complète publiée par le poète épique et théoricien de l'art Franz Christoph von Scheyb (Emmingen, 26 février 1704 - Vienne, 2 octobre 1777) en 1753. En 1809, le dominicain Podocatharus Christianopulus la fait paraître en Italie, avec un long commentaire de sa composition. La première édition moderne est due à Konrad Miller (Oppeltshofer, 21 novembre 1844 - Stuttgart, 25 juillet 1933), un professeur allemand, à Stuttgart en 1888 ; il la reproduisit ensuite dans son *Itineraria romana* en 1916. Puis elle ne fut réimprimée qu'en 1976 par Ekkehard Weber (né le 30 avril 1940 à Vienne), professeur à l'université de Vienne, qui trouva que quelques erreurs s'étaient glissées dans l'édition de Miller.

La *Table de Peutinger*, nom sous lequel elle est maintenant connue, représente l'Empire romain de la Grande-Bretagne jusqu'à l'embouchure du Gange et au Sri Lanka. Même la Chine est mentionnée. C'est la seule carte ancienne qui représente le réseau routier du *cursus publicus*. Elle contient des informations qui ne figurent sur aucun autre manuscrit. Elle se présente sous la forme d'un rouleau de 6,745 m de long et 34 cm de large et est composée de onze feuilles de parchemin collées ensemble. Les villes, les mers, les fleuves et les rivières, les forêts et les montagnes y figurent. Les échelles ne sont pas les mêmes du nord au sud et de l'ouest à l'est. À cause des dimensions de la carte, des pays contigus ne le sont plus. Ainsi, la première feuille montre-t-elle l'est de la Grande-Bretagne, la Hollande, la Belgique, une partie de la France et l'ouest du Maroc. La péninsule ibérique et l'ouest de la Grande-Bretagne ne sont pas représentés et devaient sans doute figurer sur une douzième feuille qui a été perdue. Les noms des régions ainsi que ceux des peuples qui les habitent sont fournis, mais les positions sont souvent inexactes. Les Ruteni, peuple proche de Rodez, sont placés entre Bourges et Clermont-Ferrand ; les Cadurci, de Cahors, se retrouvent au sud d'Angers ; les Veneti, du sud de la Bretagne, se

rencontrent à l'embouchure de la Seine. Il en est de même des villes : Périgeux est au nord-est de Toulouse et au nord-ouest d'Agen, Limoges est voisin de Cahors, Argentan et Rennes sont au-dessus l'une de l'autre. Et les fleuves ne coulent pas toujours dans la bonne direction. Malgré l'étirement des contours géographiques, qui en rend la lecture difficile, les itinéraires routiers sont schématiquement corrects. La plupart sont orientés est-ouest et parallèles les uns aux autres. Les embranchements et les carrefours sont signalés. La Table n'est pas destinée à décrire correctement les territoires couverts. C'est, en fait, une sorte de carte routière et fluviale. Le but recherché est uniquement de faciliter les voyages. Chaque station est indiquée par un coude et porte un chiffre donnant la longueur, plus ou moins correcte, de l'étape, soit un total d'environ 200.000 km de routes ! Pas moins de 555 villes et 3.500 autres lieux sont répertoriés, souvent illustrés par un petit croquis. C'est l'un des premiers témoignages d'un langage véritablement cartographique. Les villes d'eaux, étapes recherchées, sont signalées par des thermes schématisés. Un port sur le Rhône est figuré par un bâtiment semi-circulaire. Rome, Constantinople et Antioche figurent sur des médaillons. Les phares et les sanctuaires, comme Saint-Pierre de Rome, sont indiqués. On peut la consulter sur plusieurs sites internet dont : //www.hs-augsburg.de/ harsch/Chronologia/Lspost03/Tabula/tab_pe00.html

On peut dater la carte du douzième ou du treizième siècle, certains historiens l'attribuant à un moine de Colmar qui l'aurait exécutée en 1265. Cependant, des études récentes de paléographie la datent des environs de 1200 tout au plus et fixent sa provenance de l'ancienne Souabe, région qui comprend le sud-ouest de l'Allemagne et la partie allémanique de la Suisse. C'est cependant un document encore largement énigmatique et dont bien des aspects demeurent controversés. D'après certains, il est clair qu'il s'agit d'une copie d'un original beaucoup plus ancien, peut-être réalisé vers 365 par Castorius, géographe et philosophe romain, après le règne de Constantin (Naissus, aujourd'hui Nis en Serbie, 27 février 272 - près de Nicomédie, 22 mai 337) mais avant celui de Théodose Ier (Cauca, 347 - Milan, 17 janvier 395). En effet, la carte mentionne Constantinople qui a été fondée en 328. Mais on y trouve également Pompéi, détruite lors de l'éruption du Vésuve en 79, et des villes de Germanie inférieure qui ont disparu au début du cinquième siècle. Le cartographe a utilisé des sources remontant à la première moitié du premier siècle puisque le royaume alpin d'un certain Cottius est mentionné, alors qu'il cessa d'être indépendant en 63. Par contre, la *via Æmilia Scauri* construite en

109 av. J.-C. n'y figure pas. Aucune route n'est indiquée non plus entre Pise et Luni, alors que figurent bien les *Fossae Papirianae*, marais situés près de l'actuelle *Versilia*, dénommés *Fossis Papirianis.*

On s'interroge aussi sur la forme inhabituelle du document qui ressemble à celle d'un rouleau de papyrus. Il pourrait s'agir d'une copie d'une tapisserie ou d'une peinture murale. Peut-être est-elle identique à la carte dressée par Marcus Vipsanius Agrippa (ca. 63 av. J.-C. - Capua, 12 mars 12 av. J.-C.), ami personnel de l'empereur Auguste. Après sa mort, la carte fut sculptée dans le marbre et placée dans le *Porticus Vipsania*, près de l'Autel de la paix au Champ de Mars à Rome, le long de la *Via Flaminia* (mais son emplacement est incertain). On connaît son existence d'après l'*Histoire naturelle* de Pline l'Ancient. Si cette carte était destinée, dès sa conception, à être placée sous la colonnade du *Porticus Vipsania*, beaucoup plus longue que haute, on peut comprendre qu'elle ait été étirée dans le sens de la longueur et aplatie dans celui de la hauteur ; il s'agissait d'une nécessité architecturale. À l'époque romaine, on construisait deux types de portiques : les uns encadraient un large espace rectangulaire, les autres s'étiraient le long d'une rue. On peut supposer que celui-ci était rectangulaire, ce qui expliquerait que l'ouest de la Grande-Bretagne porté sur la douzième feuille de la *Table de Peutinger* rejoigne en fait sa partie est située sur la première. Cette conjecture repose sur les *Historiae* de Tacite où il mentionne que des détachements illyriens y étaient cantonnés (Livre 1, Chapitre 31). Par la suite, la carte a été remaniée plusieurs fois pour tenir compte en particulier des conquêtes romaines de la Grande-Bretagne, de la Mésopotamie et de la Dacie. Le copiste médiéval fut le dernier à la mettre à jour. Il lui ajouta quelques commentaires sur des lieux cités dans la Bible, le désert du Sinaï par exemple. Il fit également usage, pour les limites de la carte, des écrits de Pline l'Ancien, Hérodote et de ceux des historiens qui décrivaient les expéditions d'Alexandre-le-Grand en Perse et en Inde. Il montre aussi où l'on rencontre des scorpions et des éléphants.

Des études récentes ont prouvé que, vers 1480-1490, Pellegrino Priscani (1435 - 1510), professeur d'astronomie à Ferrare et archiviste de la famille d'Este, a vu, consulté et copié une section d'une carte pratiquement identique à la Table de Peutinger dans ses détails et ses couleurs et qu'il nommait *Cosmographia.* Elle se trouvait alors dans l'antichambre du palais de l'évêque de Padoue et, selon lui, elle avait été acquise par les ambassadeurs vénitiens auprès du Conseil de Bâle entre 1431 et 1449. Elle disparut de ce palais peu après la visite de Priscani, à l'époque

même où Peutinger séjournait à Padoue et où Celtis sillonnait la région à la recherche de manuscrits pour Maximilien. La carte de Padoue pourrait être un double de celle de Peutinger et, bien qu'elles présentent des différences notables, elles pourraient toutes deux provenir d'une source commune pré-carolingienne datant d'avant l'an 700, comme des comparaisons avec la *Cosmographie de Ravenne* le laissent supposer. On se demande aussi si la Table de Peutinger est un archétype ou si elle appartient à une certaine tradition cartographique dont les autres exemplaires ont disparu. Padoue n'est qu'à 105 km de Ravenne, mais Bâle se situe sur le Rhin à 115 km du monastère de Reichenau, provenance la plus plausible de la Table de Peutinger. De plus, le catalogue de la bibliothèque de ce monastère mentionne une *Mappa mundi in rotulis II / rotulo I* de 822-823 qui pourrait en être l'ancêtre direct, peut-être carolingien. On voit que le débat sur ses origines est encore largement ouvert.

La Table de Peutinger est une source importante d'informations non seulement pour les historiens, mais aussi pour les archéologues dans l'identification des sites découverts et l'étude des vestiges des routes romaines. Elle n'eut cependant pas d'impact majeur sur la cartographie du Moyen Âge. En 2007, elle a été inscrite dans le Registre de la mémoire du Monde de l'UNESCO (http ://portal.unesco.org/ci/fr/ev.php-URL_ID =22627&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html).

(voir Biblio : Noël et Carpentier, Salway, Talbert).

Voir : J. Lendering, www.livius.org/pen-pg/peutinger/map.html

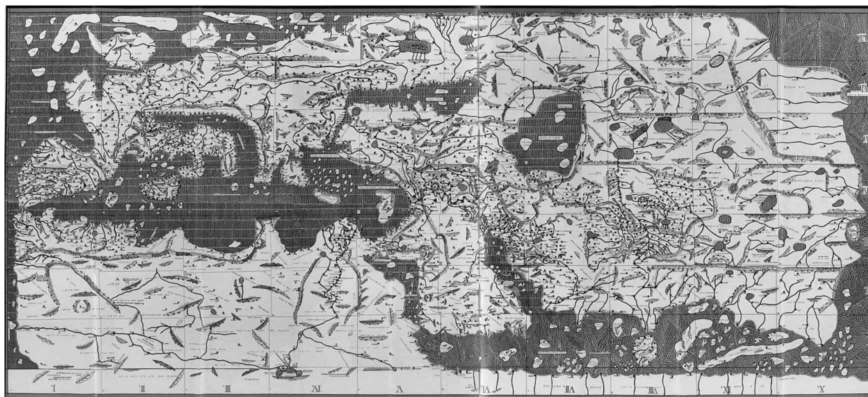
Le Moyen Âge et la Renaissance

La cartographie européenne cessa pratiquement d'exister après la chute de l'Empire romain en 476. Au Moyen Âge, en Europe, on trouve des cartes dites en T.O. car le monde y est délimité par une mer circulaire en O où s'inscrit un T. La barre verticale du T représente la Méditérranée. Sa barre horizontale vers la gauche indique le nord. La mer Noire et le Don y sont figurés. La partie droite de la barre horizontale du T montre le sud, c'est-à-dire le Nil. Parmi les plus célèbres on trouve la mappemonde de Beatus (ca. 730 - 798), un moine du monastère Saint-Martin de Liébana en Espagne, qui accompagne son *Commentaire sur l'Apocalypse*, et celle dite d'Hereford, attribuée à un cartographe peu connu, Richard de Haldingham, qui date de la fin du XIIIe siècle. On connaît 26 copies de l'œuvre de Beatus réparties dans 8 pays, dont celle

conservée à la Bibliothèque nationale de France (cote Ms Lat. 8878) et qui fut réalisée à l'Abbaye de Saint-Sever en Gascogne sous l'abbatiat de Grégoire de Montaner entre 1028 et 1072. Ces mappemondes montrent souvent des monstres qui proviennent de la mythologie et des récits grecs décrivant des peuples mythiques. Ces cartes eurent un succès durable mais elles n'étaient pas d'une grande utilité pour s'orienter. On eut alors recours à des itinéraires, sortes de tables donnant la liste des villes à traverser et des obstacles à franchir (mers, fleuves, montagnes, etc.) pour aller d'un point à un autre, les distances ou les temps de parcours et les possibilités d'hébergement. Chaque ville était identifiée par un monument significatif. À cette époque, la cartographie était dominée par les idées religieuses qui, de nouveau, penchaient pour une terre plate circulaire. Ces idées connaîtront leur apogée avec les mappemondes, des cartes qui accordent la première importance à Jérusalem et à la Terre sainte, destination des croisades. C'est le cas, par exemple, de la mappemonde d'Ebstorf qui date de 1239 et que les recherches récentes attribuent au clerc anglais Gervais de Tilbury (ca. 1155 - 1234), un assidu à la cour de Henri II Plantagenêt (Le Mans, 5 mars 1133 - Chinon, 6 juillet 1189). Il s'agissait d'une peinture circulaire de trois mètres et demi de diamètre. Elle était composée de trente feuilles de parchemin et comptait jusqu'à seize nuances de couleurs. Elle fut détruite en 1943 lors du bombardement de Hanovre. Dans le *Liber Floridus*, rédigé en 1120 par Lambert, chanoine de Saint-Omer, on trouve l'Europe curieusement représentée dans un quart de cercle. Seuls y sont nommés le Rhône et le Rhin. La Loire et la Seine y figurent mais sans leur nom et la seule ville inscrite est Narbonne.

Mais, après le sommeil du Moyen Âge, le flambeau fut repris par les Arabes. C'est à leurs navigateurs que l'on doit le renouveau de la cartographie. Ils établirent des cartes marines très exactes. Le chef-d'œuvre de la cartographie arabe est la mappemonde de Al-Idrîsî achevée en 1154 pour le compte du roi de Sicile Roger II (22 décembre 1095 - Palerme, 26 février 1154), le fondateur du royaume. Elle fut gravée sur une tablette d'argent, détruite en 1160. Al-Idrîsî réalisa également un autre ouvrage géographique important, *Récréation de celui qui désire parcourir le monde* appelé le *Livre de Roger*, qui contient une mappemonde qui s'étend de l'Europe occidentale à l'Inde et à la Chine et de la Scandinavie au Sahara ainsi que 68 cartes détaillées.

À partir du XIIIe siècle, les navigateurs, grâce à la boussole, n'hésitent plus à s'éloigner des côtes. Ils savent garder un cap et leurs bateaux



Carte du *Livre de Roger*

deviennent ainsi des instruments de mesure angulaire. Connaissant la direction à suivre ainsi que la distance parcourue (mesurée avec un loch), ils dessinent des cartes précises de la Méditerranée. Les côtes y sont représentées avec précision mais l'intérieur des terres souffre d'un manque de détails. Elles ne comportent ni méridiens ni parallèles mais des lignes relient les ports importants, d'où leur nom de *portulans*. Ces lignes forment ce que l'on appelle un *marteloire*. Un marteloire se présente comme un cercle à l'intérieur duquel on a placé des points équidistants, chacun d'eux étant relié à ses voisins immédiats. Il permet aux pilotes d'effectuer une estimation de leur position au moyen de deux compas et d'un simple calcul de règle de trois. Ils situent ainsi le point de destination d'un navire en connaissant son point de départ, ses routes et les distances parcourues grâce à l'échelle, qui apparaît pour la première fois sur une carte. La position du marteloire n'est pas liée à un point particulier de la carte mais son orientation sert de référence pour la lecture des routes, comme avec une rose des vents. Dans son *Arte de navegar*, paru en 1545 à Valladolid, Pedro de Medina (Séville ?, 1493 - ca. 1567) fournit une transcription des données du marteloire. Cet ouvrage connut un immense succès en Europe, comme en témoignent ses nombreuses traductions, dont celle publiée en français à Lyon en 1554. (Biblio : Y. Caradec, H. Michea). On doit à Angelino Dulcert un portulan qui date de 1339 ; élaboré à Palma de Majorque, il est le prototype des cartes catalanes qui seront réalisées aux XIVe et au XVe siècles. Nés dans les pays chrétiens de la Méditerranée occidentale, les

portulans sont, en grande partie, fabriqués par des juifs, en particulier à Majorque. Les Arabes ne tardent pas à en produire également bien qu'ils ne soient pas les initiateurs de ce type de carte. Les portulans contribuèrent grandement aux progrès de la cartographie.

Le plus ancien atlas maritime qui nous soit parvenu est dû au génois Pietro Vesconte ; il date de 1313. Vesconte, l'un des premiers cartographes de métier, fait la distinction entre l'atlas, dont il nomme les feuilles « tables », et la carte isolée qu'il appelle « carta ». La feuille de l'atlas de Vesconte où figure la Méditerranée centrale est orientée avec l'est en haut, alors que la *Carte pisane*, qui date de la fin du siècle, est orientée vers le nord magnétique. Les plus illustres cartographes arabes sont quelque peu postérieurs : Ibn Battuta (Tanger, 24 février 1304 - Marrakech, ca. 1368) et Ibn Khaldoun (Tunis, 1332 - Le Caire, 1406) à l'époque où commence déjà le déclin de l'Islam en Europe. L'Empire byzantin s'achève par la chute de Constantinople en 1453.

On connaît trois globes célestes antiques comportant l'ensemble des constellations repérées par les Anciens. Bien qu'il soit impossible de les dater avec précision, le plus ancien semble être le globe en marbre de l'Atlas Farnèse, une copie romaine en marbre du Ier ou IIe siècle d'une statue grecque du troisième siècle avant J.-C. qui montre le géant Atlas portant un globe de 65 cm de diamètre sur ses épaules. Cette statue, qui se trouve au Musée national de Naples, est du plus grand intérêt car, comme l'a affirmé Bradley Schaefer, professeur d'astronomie à l'université d'État de Louisiane, lors d'un congrès de l'*American Astronomical Society* à San Diego en 2005, les constellations qui y sont représentées correspondraient aux positions qu'elles avaient lors des observations réalisées par Hipparque de Nicée. Cette hypothèse n'est cependant pas acceptée par tous les chercheurs. Un second globe se trouve à Mayence et date des années 150-220 AD. Il a 11cm de diamètre et est constitué de deux demi-sphères en laiton. Des lignes formant un système de coordonnées y sont gravées, ainsi que quarante-huit constellations. On y voit la Balance figurée selon la description donnée par le poète grec Arato (Soli, Sicile, ca. 320 av. J.-C. - Macedoine, ca. 240 av. J.-C.) dans ses *Phaenomena* à la place des Colliers du Scorpion. Il contient également la première représentation picturale connue de la Voie lactée. Le globe de Kugel est une sphère d'argent créée entre le deuxième siècle avant J.-C. et le troisième siècle après. Il pourrait être plus ancien que le Globe de Farnèse. Les principaux cercles astronomiques y sont figurés, mais il manque les deux cercles parallèles à l'écliptique, situés à 6° au nord

et au sud de celui-ci, qui, sur les deux autres sphères, matérialisent la ceinture zodiacale. Il contient, de plus, de nombreuses erreurs quant à la taille et à la disposition des catastérismes (synonyme de constellation, titre d'un ouvrage d'Érathostène où il décrit leurs figures et évoque des fables sur les étoiles), sans doute parce que son auteur n'était pas familiarisé avec l'astronomie. Enfin, un autre globe de la même époque serait détenu dans une collection privée et n'a pu être scientifiquement étudié. Les Arabes poursuivirent la tradition des globes célestes. Selon la tradition, les premiers dateraient du neuvième siècle, mais le plus ancien qui nous soit parvenu a été fabriqué en Espagne, à Valence, vers 1085. En Europe, l'idée du globe terrestre réapparaît avec Roger Bacon (Ilchester, Somerset, 1214 - Oxford, juin 1282) et Albert le Grand (Lauingen, Souabe, ca. 1200 - Cologne, 1280).

Quelques moines reprennent le flambeau de la cartographie vers le XIVe siècle, sans doute poussés par les voyages de Marco Polo (Venise, 15 septembre 1254 - Venise, 8 janvier 1324). Des interrogations fondamentales sur les limites du monde, sur ses parties habitées et, éventuellement, sur celles qui sont inaccessibles, questions touchant aux doctrines de la création et de la rédemption, se mêlent à l'aspect purement géographique. Des cartographes travaillent à Gênes, Venise, Florence et en Sicile. Cristoforo Buondelmonti (Florence, ca. 1385 - ca. 1430) est un religieux qui séjourne en Grèce pendant huit ans, peut-être au service des ducs de Naxos ou des établissements religieux catholiques de l'Égée, puis, pendant six ans, parcourt Cyclades et îles Ioniennes. Il s'intéresse à l'archéologie et, influencé par Ptolémée, il décrit et dessine les îles grecques dans son ouvrage *Liber Insularum Cicladorum*. Son *Liber Insularum Archipelagi*, paru en 1420 et dédié au cardinal Giordano Orsini (1360/70 - Petricoli, 29 juillet 1438), contient un plan de Constantinople en perspective cavalière. Pietro Vesconte réalise une carte du monde médiéval. Elle accompagne le livre de Marino Sanudo dit l'Ancien (ca. 1270 - ca. 1343) *Liber secretorum fidelium crucis* qui appelle à une nouvelle croisade pour reconquérir la Terre sainte et est remis au pape Jean XXII en 1321. Cet appel ne sera pas suivi d'effet. Les Catalans de Barcelone et de Majorque s'occupent de l'Extrême-Orient. Jean Ier d'Aragon (Perpignan, 1350 - Foix, 1393) commande à Cresques Abraham (ca. 1325 - ca. 1387) un atlas pour l'offrir au roi de France Charles V le Sage (Vincennes, 21 janvier 1338 - Beauté-sur-Marne, 16 septembre 1380) ; c'est l'*Atlas Catalan*, véritable chef-d'œuvre qui date de 1375 et est conservé à la Bibliothèque nationale de France. Il est re-

haussé de scènes mythologiques et historiques, de références bibliques, de figures légendaires et intègre des représentations des richesses de la Chine décrites presqu'un siècle plus tôt par Marco Polo. On doit au cartographe juif majorcain Mecia de Viladestes, en 1413, un grand portulan, rehaussé de couleurs vives et richement enluminé. L'Afrique y est particulièrement bien représentée. On y voit un grand fleuve qui coule d'ouest en est et rassemble, comme l'avait déjà fait Al-Idrîsî, le Sénégal, le Niger et le Nil. Des cartes de Grande-Bretagne sont dressées par le moine bénédictin Matthew Paris (ca. 1200 - 1259) à partir de 1255. L'Écosse y est figurée comme une île. On lui doit également des itinéraires linéaires des pèlerinages de Londres à Jérusalem. Puis on trouve la carte de Grande-Bretagne, dite de Gough, du nom de l'un de ses propriétaires, l'antiquaire Richard Gough (Londres, 21 octobre 1735 - Enfield, 10 février 1809), qui date de 1360 et semble avoir été créée à partir d'un portulan et d'une mappemonde auxquels on a rajouté des renseignements tirés d'un itinéraire. Selon Gough, elle pouvait « prétendre à être la première à indiquer les routes et les distances ».

La version grecque de *La géographie* de Ptolémée ne fut redécouverte qu'à la fin du XIIe siècle par l'érudit byzantin Maxime Planude (Nicomédie, ca. 1255 - Constantinople, ca. 1305). Elle fut sans doute connue d'un certain nombre de savants puisque le mathématicien et astrologue italien Paolo Dagomari (Prato, 1282 - Florence, 1374), connu sous le nom de Paolo dell'Abbaco, se livre, dans le manuscrit autographe de son *Trattato d'abbaco*, à une critique de la méthode de détermination des latitudes et des longitudes utilisée par Ptolémée. Rapportée de Constantinople par l'humaniste grec Manuel Chrysoloras (Constantinople, ca. 1355 - Constance, 15 avril 1415) émigré en Italie, la version grecque du livre de Ptolémée fut traduite en latin entre 1401 et 1406 par Jacopo d'Angelo (Scarperia, ca. 1360 - ca. 1410), un érudit florentin, sous le titre de *Cosmographie*. Offerte au pape Alexandre V (Crète, 1340 - Bologne, 3-4 mai 1410), elle était accompagnée de cartes, transcrites à leur tour en latin vers 1415, et dont l'origine demeure incertaine. Sa diffusion fut favorisée par les cardinaux Guillaume Fillastre (La Suze, 1348 - Rome, 6 novembre 1428), archevêque d'Aix-en-Provence, et Pierre d'Ailly (Compiègne, 1351 - Avignon, 9 août 1420), qui avait participé au grand schisme d'Occident avant d'agir pour le rétablissement de l'unité de l'Église, à l'occasion du concile de Constance (1414 - 1418). Pierre d'Ailly en fait paraître un commentaire en 1410. En 1427, elle est complétée par une carte de l'Europe du Nord de Claudius Clavus (Île de

Funen ?, Danemark, 14 septembre 1388 - ?), Claudius Claussön Swart de son vrai nom, un danois qui avait exploré la Norvège, l'Islande et le sud du Groenland. C'est grâce aux coordonnées des huit-mille lieux laissées par Ptolémée que le moine et cartographe allemand Nicolaus Germanus (ca. 1420 - ca. 1490) fut capable de refaire des cartes identiques, en projection conique, vers 1460-1470 (vingt-sept cartes en tout). Il les dédia à un célèbre mécène italien, Borso d'Este (1413 - 20 août 1471), le premier duc de Ferrare. La première version italienne de *La géographie*, portant ce titre, fut imprimée à Florence en 1482 par l'humaniste Francesco Berlinghieri (Florence, 1440 - 1501). Elle était agrémentée de commentaires en vers, et il y ajouta quatre cartes nouvelles de la France, de l'Italie, de l'Espagne et de la Terre sainte. Pour la France, il s'agit de la première carte imprimée. Les contours du littoral sont corrects, bien meilleurs que ceux issus de la carte très défectueuse de Ptolémée exécutée en 1427 pour le cardinal de Reims, les montagnes sont figurées sous forme de massifs d'où partent les cours d'eau et révèle une bonne connaissance géographique. Certains pays, comme l'Italie et l'Espagne, étaient représentés en deux versions différentes, tant dans la forme que dans les détails géographiques. Une autre édition de Ptolémée, par le moine dom Nicolas, parut à Ulm la même année. Enfin, le texte grec fut édité par Érasme (Rotterdam, 1466 ou 1469 - Bâle, 12 juillet 1536) à Bâle en 1533. Une édition française vit le jour à Lyon, deux ans plus tard, chez les frères Trecsel. Martin Waldseemüller (dont il sera largement question plus loin) en 1513, puis Jean Grüninger (né à Markgrönigen dans le Wurtemberg - Strasbourg, 1531) en 1525, en avaient déjà fait paraître une, mais à Strasbourg, alors en dehors des limites du royaume.

Comme nous l'avons vu, Ptolémée avait donné trois projections différentes ainsi que des tables de longitudes et de latitudes qui permettaient de redessiner le Monde selon lui. L'imprimerie, développée en Chine, est introduite en Europe vers 1450. Elle autorise une multiplication rapide des éditions. Les premières cartes imprimées à partir de la fin du XVe siècle sont les siennes. Sa *Géographie* a donc une influence immédiate considérable et devient l'une des bases de la cartographie occidentale. Plus de soixante éditions en auront été publiées, en grec, en français et en italien, à la date de 1730. (voir Biblio : Gautier Dalché).

La renaissance de la cartographie européenne est due aux conquêtes terrestres et aux grandes découvertes. En 1444, le médecin et astronome Henri Arnault de Zwolle (ca. 1400 - 1466), conseiller de Philippe le Bon, réalisa une carte de la région située entre la France et la Bourgogne.

Son but était de délimiter les enclaves françaises afin de simplifier les frontières. Fra Mauro (Venise, ca. 1385 - Venise, 1460), un moine de Murano, fut le plus célèbre cosmographe de son temps. De 1457 à 1459, il exécuta une mappemonde, que l'on peut encore voir dans l'une des salles du monastère Saint-Michel de Murano. La totalité de l'ancien monde y est représentée avec une précision surprenante et des commentaires qui reflètent la connaissance géographique de son époque y sont adjoints. Fra Mauro réalisa son travail avec son assistant Andrea Bianco, navigateur-cartographe célèbre pour son atlas du monde paru en 1436, sous la responsabilité d'une commission nommée par le roi Alphonse V de Portugal, dit l'Africain (Sintra, 15 janvier 1432 - Sintra, 28 août 1481). La carte fut terminée le 24 avril 1459. Envoyée au Portugal, elle fut perdue. Une lettre l'accompagnait. Elle était destinée au prince Henri le Navigateur (Porto, 1394 - Sagres, 1460), l'oncle d'Alphonse V, pour l'encourager à continuer à financer des voyages d'exploration. Le Portugal avait alors l'une des plus importantes écoles cartographiques du monde. Cette prépondérance résultait du nombre de cartographes ainsi que de leur perfection technique, géographique et artistique. Les grandes découvertes bénéficièrent également du perfectionnement de l'astrolabe par Abraham Zacuto (Salamanque, ca. 1450 - Turquie, ca. 1510), un professeur des universités de Salamanque et de Saragosse, qui s'était réfugié à Lisbonne quand les juifs avaient été chassés d'Espagne. Il est également l'auteur d'un almanach perpétuel de grande précision utilisé par les marins portugais pour déterminer la position de leurs vaisseaux en pleine mer, grâce aux données fournies par l'astrolabe. Ses contributions ont sans doute permis aux Portugais d'atteindre le Brésil et l'Inde.

À la suite d'Henri le Navigateur, qui fut parmi les premiers à encourager l'usage de méthodes astronomiques pour la navigation en haute mer, les Portugais, peuple de bergers et de viticulteurs jusqu'au XVe siècle, commencent l'exploration de la planète. Ils débutent en 1412, et peut-être même avant, leurs voyages le long de la côte occidentale de l'Afrique. Ils s'emparent de Ceuta en 1415. Ils découvrent les îles de l'Atlantique et Gil Eanes, un écuyer au service d'Henri le Navigateur, passe le cap Bojador (aujourd'hui cap Juby, au Sahara occidental) en 1434. Ils explorent les pays africains. Le Vénitien Andrea Bianco fait figurer leurs découvertes sur un portulan dès 1436. Mais ils cherchent une voie vers les Indes. L'équateur est franchi en 1471, puis on dépasse le Congo en 1484. Bartolomeu Diaz (Algarve, Portugal, ca. 1450 - disparu au large du cap de Bonne-Espérance, 29 mai 1500) découvre le cap de

Bonne-Espérance en 1487 et Vasco de Gama (Sines, ca. 1460 - Cochin, Indes, 24 décembre 1524) le double dix ans plus tard. Christophe Colomb atteint l'Amérique en 1492. En 1500, Pedro Álvares Cabral (Belmonte, 1467 - Santarém, 1520 ou 1526) découvre le Brésil, Gaspar Corte-Real (ca. 1450 - 1501) aborde Terre Neuve et, avec son frère, traverse l'isthme de Panama. Puis ce sera enfin Magellan qui accomplira le premier tour du monde de 1519 à 1522. Entre-temps, les Portugais avaient aussi exploré la Chine, le Japon, Formose, les Moluques et les îles australes.

L'une des plus célèbres mappemondes incunables est celle qui se trouve dans le *Liber Cronicarum*, ouvrage connu sous le nom de *Chroniques de Nuremberg* de Hartmann Schedel (Nuremberg, 1440 - Nuremberg, 1514), un médecin de Nuremberg qui avait étudié à Padoue, livre publié en juillet 1493 par le libraire Anton Koberger (ca. 1440-1445 - 3 octobre 1513), parrain d'Albrecht Dürer. Ces Chroniques proposent une histoire du Monde, depuis sa création jusqu'en 1490 et contiennent 1.800 illustrations gravées sur bois par Michael Wohlgemuth (Nuremberg, 1434 - Nuremberg, 30 novembre 1519) et Wilhelm Pleydenwurff (Nuremberg, ca. 1460 - Nuremberg, 1494), dont seulement deux cartes, une de l'Europe et cette mappemonde.

Les terres nouvellement découvertes sont figurées, en 1500, sur la carte manuscrite de Juan de la Cosa (Santoña, ca. 1449 - Turbaco, 1510). En 1507, des chanoines de Saint-Dié publient la première carte où les nouvelles terres découvertes par Christophe Colomb sont désignées sous le nom d'*Amerique* et où l'Asie est bien distinguée de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud. Nous reviendrons ultérieurement sur ce sujet. Une carte nautique de Girolamo da Verrazano (1481 - 1528), qui, avec son frère aîné Giovanni, l'explorateur, est au service de François Ier, est publiée à Lyon en 1524. En 1525, Oronce Fine fait paraître la première carte de France. Il s'agit de quatre feuilles gravées sur bois à une échelle de 1/2.000.000e. En 1531, il produit aussi une carte du monde. Il détermine les longitudes à l'aide des éclipses de la Lune. François Ier le nommera Lecteur royal des mathématiques en 1530 et lui attribuera une chaire au Collège royal (maintenant Collège de France) qu'il fondera en 1530. Il faut aussi mentionner les cartes de l'allemand Sebastian Münster (Ingelheim, 20 janvier 1488 - Bâle, 26 mai 1522) qui se trouvent sans sa *Cosmographia Universalis* parue en 1544. Il y donne, en particulier, une mappemonde en projection ovale où l'océan Pacifique est, pour la première fois, désigné sous le nom de *Mare pacificum*. Publié d'abord en allemand, cet ouvrage est l'un des plus lus du XVIe siècle et l'on peut

vraisemblablement lui attribuer la seconde place en termes de popularité après la Bible. Ce succès est en partie dû aux gravures sur bois, dont certaines sont de Hans Holbein (Augsbourg, 1497 - Londres, 29 novembre 1543). Au total, plus de cent-vingt collaborateurs participèrent à cette œuvre qui fut, en son temps, une référence en géographie et en histoire. On y retrouve de nombreuses illustrations sur les modes de vie de l'époque, de même que des vues des villes.

Le Val de Loire est alors terre de séjour royal. C'est grâce à la présence de nombreux savants et d'un graveur hollandais dans cette région que Maurice Bouguereau, un éditeur de Tours, publie en 1594 un atlas de dix-huit cartes assez précises pour l'époque sous le titre de *Théâtre françois*. Il se base sur une carte de Jean Jolivet de 1560, elle-même imitée de celle d'Oronce Fine. En 1545, Jolivet avait en effet produit trois cartes (Berry, Normandie et Picardie), pour l'instruction de Marguerite de Navarre, sœur de François Ier. Des cartes des provinces font leur apparition. Le travail de Bouguereau est reprit dans la *Charte de la France* dessinée en 1594 par François de La Guillotière (Bordeaux, ? - Paris, octobre 1594), mais publiée seulement en 1613 par l'éditeur parisien Jean IV Leclerc. Gravée en neuf feuilles, elle résume toutes les connaissances géographiques de l'époque sur la France. La carte est assez précise, mais faute de coordonnées longitudinales, son étendue est-ouest est trop importante. Elle sera constamment recopiée jusqu'à la fin du XVIIe siècle. L'éditeur Jean Boisseau, enlumineur du Roi pour les cartes marines et géographiques, repris le flambeau et fit paraître, en 1642, le *Théâtre des Gaules*, puis Nicolas Sanson (Abbeville, 20 décembre 1600 - Paris, 7 juillet 1667) imprima, en 1650, un *Théâtre de la France* qui s'appuyaient sur les travaux précédents.

Dieppe fut un centre cartographique important entre 1540 et 1585. De riches mécènes, des armateurs portugais et français, ainsi que les rois Henri II de France et Henri VIII d'Angleterre y passent commande de portulans et de mappemondes. Toutes ces cartes portent des inscriptions en français, en portugais ou dans un jargon franco-portugais, ce qui peut laisser supposer que des cartographes portugais sont venus s'y installer. Elles sont destinées à la navigation et comportent la rose des vents et des tracés de lignes loxodromiques. Parmi les cartographes dieppois, il faut citer de nouveau Guillaume Le Testu, qui explore le littoral brésilien en 1551. Il est l'auteur d'un atlas manuscrit de 56 cartes, *Cosmographie Universelle selon les navigateurs, tant anciens que modernes*, qui date de 1555-1556 et est dédié à l'amiral Gaspard II de Coligny. Par la finesse

du dessin et le luxe de l'ornementation, ce travail surpasse les meilleures productions espagnoles et portugaises et résume toute la géographie du XVIe siècle. En 1566, il dessine un planisphère en net progrès, presque totalement débarrassé des figures fantastiques. Capitaine d'un navire de 80 tonneaux, il croise au large de Panama en 1573 et se lie avec le célèbre corsaire anglais Francis Drake (Tavistock, Devon, février-mars 1542 - Portobelo, Panama, 28 janvier 1596). Ensemble, ils attaquent un convoi espagnol. Le Testu est blessé et fait prisonnier par les Espagnols qui l'achèvent.

L'Italie a toujours été le centre d'une intense production cartographique. En effet, de nombreux navigateurs sont issus de ce pays qui avait alors des relations commerciales avec le monde entier. Giacomo Gastaldi (Villafranca, ca. 1500 - Venise, octobre 1566) était le cartographe officiel de la République de Venise. Il nous a laissé plus de deux cents cartes réalisées entre 1544 et sa mort. Le premier, il dresse une carte de la Nouvelle-Angleterre et une sur laquelle apparaissent les Bermudes. Sa mappemonde de 1546 montre l'Amérique, l'Afrique et l'Asie. En 1548, il publie une édition de la *Géographie* de Ptolémée qui contient des cartes réalisées à partir de 1542 et deux planisphères. En 1562, Cosme Ier de Médicis (1519 - 1574) demande à Ignazio Danti (Pérouse, avril 1536 - Alatri, 19 octobre 1586), un dominicain qui est son cosmographe, de dresser des cartes des différentes parties du monde et de fabriquer un grand globe terrestre. Ce globe et ces splendides cartes, peintes à l'huile sur les cinquante-trois portes des armoires de la « salle des cartes » du Palazzo Vecchio de Florence, sont toujours visibles. Cosme ayant fait connaître au pape sa volonté de modifier le calendrier, un geste politique qui en ferait l'égal de Jules César, Danti fait dresser sur la façade de la basilique Santa Maria Novella à Florence, un anneau équatorial et un quadrant, afin d'étudier le moment exact de l'équinoxe. Il s'aperçoit ainsi que l'équinoxe de printemps de 1574 tombe le 11 mars, soit 10 jours plus tôt que la date donnée par le calendrier Julien. On lui doit le premier traité sur l'astrolabe paru en Italie (1569). À la mort de Cosme, en 1574, Ignazio Danti devient professeur de mathématiques à l'université de Bologne, puis, en 1580, il est appelé à Rome par le pape Grégoire XIII pour prendre part à la réforme du calendrier. Il sert ensuite le pape Sixte V. Le grand-père de Danti, Pier Vincenzo Rainaldi, avait traduit en italien le *Tractatus de Sphaera Mundi* de Sacrobosco ; quant à son père, Guilio Danti, il fabriquait des objets d'art et des instruments astronomiques et topographiques.

Au début du XVIe siècle, les cartes de l'Europe du Nord étaient rares. On ne connaissait que celle de 1427 due à Claudius Clavus, qui fut sans doute le premier cartographe à représenter le Groenland, et celle de Scandinavie de l'humaniste et théologien Jacob Ziegler (ca. 1470 - août 1549) de 1532. Johannes Magnus (Linköping, 19 mars 1488 - Rome, 22 mars 1544) fut le dernier archevêque catholique de Suède. Il était également théologien, généalogiste et historien. Son frère cadet Olaus Magnus (Linköping, 1490 - Rome, 1er août 1557) était archidiacre de la cathédrale de Strängnäs. Lorsque la Réforme se propage en Suède, les deux frères quittent le pays en 1526. Leur exil politique commence et leur errance aussi. On les trouve d'abord à Dantzig en 1527, où ils rencontrent Copernic, puis à Rome en 1533. Attaché à son pays, y ayant beaucoup voyagé du fait de ses attributions ecclésiastiques et voulant susciter l'intérêt du Vatican afin d'y réinstaurer le catholicisme, Olaus avait entrepris dès 1527 la confection d'une carte des pays nordiques, la *Carta marina et descriptio septemtrionalium terrarum ac mirabilium rerum in eis contentarum diligentissimo elaborata anno Domini 1539*, qui parut en 1539 à Venise avec l'aide d'un certain Hieronymo Quirino, patriarche de la République de Venise. Douze années de travail lui avaient été nécessaires.

Elle se présente sous la forme de neuf planches de 56×42 cm, gravées sur bois, dont les dimensions totales sont $1,70 \times 1,25$ m. La carte s'étend de l'Atlantique Nord à l'ouest de la Russie et du nord de l'Allemangne à l'océan Artique. Le Groenland et la Scandinavie sont séparés. Les côtes et l'intérieur des terres autour de la mer Baltique sont représentés ainsi que le nord de l'Écosse, les Shetland, les îles Féroé, l'Islande et même la mythique île de Thulé. Du point de vue géographique, et bien que de nombreuses inexactitudes puissent être révélées, la carte montre un progrès considérable lorsqu'on la compare à celles qui l'ont précédée. Un grand nombre de détails concernant les régions couvertes apparaissent. Elles sont tantôt le résultat d'observations (pêche, chasse aux phoques, usage de skis et de raquettes, noces, baleines, geysers, volcans), tantôt le reflet d'affabulations (monstres divers). La carte est assortie de deux fascicules de commentaires, en allemand et en italien, ainsi que d'un commentaire en latin faisant partie de la carte elle-même. Le tirage n'a sans doute pas dépassé une vingtaine d'exemplaires. Une reproduction exacte sur cuivre fut imprimée à Rome en 1572 par le graveur Antoine Lafréry (Orgelet, Franche-Comté, 1512 - Rome, 1577). Un registre de 1577 la mentionne dans la bibliothèque du duc de Bavière puis elle dis-

parut. En 1886, Oscar Brenner, un savant allemand, en retrouva une copie à l'ancienne bibliothèque ducale, devenue la Bayerische Hof-und Staatsbibliothek de Munich. C'était un « gros rouleau » qui se trouvait parmi d'autres cartes du nord de la Scandinavie. En 1962, une seconde copie, en bien meilleur état, fut trouvée en Suisse ; elle fut achetée par la bibliothèque de l'université d'Uppsala où elle se trouve toujours. (voir Biblio : Balzamo).

L'un des premiers globes terrestres est fabriqué par l'allemand Martin Behaim (Nuremberg, 6 octobre 1459 - Lisbonne, 29 juillet 1507) vers 1492, pour sa ville natale, antérieurement aux voyages de Colomb. L'Europe et l'Asie n'y sont séparées que de 120 degrés. Il est sans doute dérivé de l'une des mappemondes de 1489-1490 d'Henricus Martellus (Heinrich Hammer), qui a quitté Nuremberg pour Florence où il s'efforce de compléter les cartes de Ptolémée en y intégrant les découvertes portugaises le long des côtes de l'Afrique et les récits de Marco Polo sur l'Extrême-Orient. C'est la gravure plane de fuseaux, inventée par Johannes Schöner (Karlstadt-sur-le-Main, 16 janvier 1477 - Nuremberg, 16 janvier 1547), un mathématicien, astronome et cartographe, en 1515, qui permet la diffusion des globes. On peut acheter des planches imprimées, avec ou sans le globe, et les coller ensuite sur leur support. Les plus anciens fuseaux gravés sont l'œuvre de Martin Waldseemüler, dont nous aurons l'occasion de reparler, pour un petit globe de 1507. Le moine suisse Heinrich Loris, dit Henricus Glareanus (Mollis, juin 1488 - Freiburg-im-Breisgau, 27/28 mars 1563), fournit l'explication de leur élaboration dans son *De geographia liber unus* publié à Bâle en 1527.

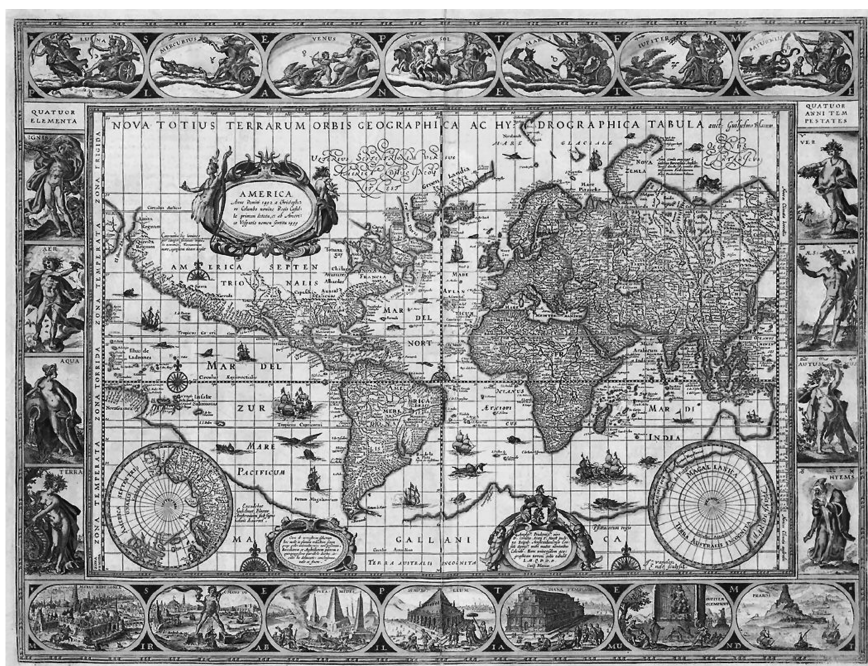
Dès l'âge de dix-huit ans, Mercator avait été initié à la construction de globes par son maître Gemma Frisius, de l'université de Louvain. En 1538, il dresse sa première carte du monde. En 1541, Charles Quint, lui commande un globe terrestre et un globe céleste. Il s'établit à Duisburg en 1552 et commence à travailler à son système de projection. Il produit une carte murale de l'Europe en 1554 et une des îles Britanniques dix ans plus tard. Sa carte du monde est terminée en 1569 ; elle comporte dix-huit feuillets. Après avoir publié en 1578 un ouvrage intitulé *Tabulae geographicae Cl. Ptolemaei ad mentem auctoris restitutae et emendatae*, il travaille à la fabrication de son atlas *Sive cosmographicae meditationes de fabrica mundi et fabricati figura* paru en 1585 et dont la version définitive fut complétée et publiée par ses deux fils en 1595, un an après sa mort.

En 1570, Abraham Ortelius, l'éditeur qui avait été chargé de la *Table de Peutinger*, publie son *Theatrum orbis terrarum* en cinquante-trois planches comportant soixante-dix cartes, qui peut être considéré comme le premier atlas universel. Tycho Brahé lui-même fabrique en 1584 un globe céleste. On en doit un autre, en 1589, au Hollandais Petrus Plancius (Dranouter, 1er janvier 1552 - Amsterdam, 15 mai 1622), alias Pieter Platevoet, sur lequel il fait figurer les étoiles découvertes par les marins autour du pôle Sud.

Toujours aux Pays-Bas, évoquons la riche famille Blaeu originaire d'Amsterdam. Willem Janszoon Blaeu (Uitgeest ou Alkmaar, 1571 - Amsterdam, 21 octobre 1638) fut l'élève de l'astronome danois Tycho Brahé durant l'hiver 1595. Son premier globe terrestre paraît en 1598. Puis, en 1605, il ouvre une boutique et un atelier d'imprimerie à Amsterdam. Il publie des atlas et des globes (vingt-trois sont connus dont le plus petit à 13, 5 cm de diamètre) d'une exactitude remarquable pour l'époque. Mais la cartographie est également devenue une affaire financière florissante. Ainsi Blaeu et Jodocus Hondius le Jeune (1594 - 1629), un autre cartographe néerlandais, se livrent-ils une guerre commerciale et scientifique qui les pousse à proposer des cartes et globes toujours plus précis et toujours plus grands. En 1613, Hondius produit des globes de 53,5 cm. Blaeu lui répond en réalisant, en 1617, une paire terrestre/céleste de 68 cm de diamètre. On recense 116 globes terrestres et 109 globes célestes de cette paire dans le monde au début du XXIe siècle. Blaeu devient, en 1633, le fournisseur officiel de cartes de la Compagnie néerlandaise des Indes orientales. En 1634, il publie *Usage des globes et sphères célestes et terrestres* qui connaît de très nombreuses rééditions.

Après la mort d'Hondius, qui était l'éditeur des cartes de Mercator, Blaeu entreprend de supplanter l'atlas de Mercator. Son monumental *Atlas Novus* est édité en deux volumes en 1635 en quatre langues : allemand (208 cartes), français (208), bas allemand ou néerlandais (207) et en latin (207). Ses deux fils, Johannes et Cornelis, deviennent également cartographes et éditeurs de cartes, atlas et globes. Johannes Blaeu (Alkmaar, 23 septembre 1596 - Amsterdam, 28 mai 1673) collabore avec son père à partir de 1631 et poursuit son œuvre après le décès de celui-ci. Mais Cornelis meurt en 1644 à l'âge de 34 ans. Johannes continue seul à gérer l'affaire. Il complète l'*Atlas Novus* qu'il édite en trois volumes en 1640, quatre en 1645, six en 1655, pour finalement publier l'*Atlas Major*. À l'origine en latin, il est traduit en flamand (9 vol.), en français (12 vol.) en espagnol (10 vol.), en anglais et en allemand. Il compte en-

viron 600 planches et 3.000 pages de texte. C'est probablement l'atlas le plus considérable jamais produit et certainement l'un des plus beaux. Sa production mobilise 15 presses et 80 hommes dans l'imprimerie familiale installée à Bloemgracht, alors un faubourg d'Amsterdam, depuis les années 1640 et qui fait l'admiration de tous les visiteurs. Une seconde imprimerie est acquise à Gravenstraat dans le centre d'Amsterdam. Blaeu ne se limite pas à la production de cartes, atlas et globes, mais s'intéresse aussi aux publications les plus diverses, ouvrages religieux inclus. C'est une catastrophe quand l'imprimerie de Bloemgracht disparaît au cours d'un incendie, le 23 février 1672. La plupart des feuillets et les planches sont détruits et ce qui reste de l'atlas à Gravenstraat est vendu à d'autres éditeurs. La société ne reprendra pas ses activités après ce coup du sort et Johannes Blaeu mourra peu après. Jusqu'à la fin du XVIIe, l'atlas Blaeu restera le livre le plus cher du marché.



Nova totius terrarum orbis geographica ac hydrographica tabula, par Blaeu (1645)

Le juriste d'Amsterdam Laurens van der Hem (1621 - 1678) utilisa l'atlas Blaeu comme base d'une collection cartographique plus impor-

tante. Il augmenta son édition de l'Atlas Major de plus de 600 cartes, dessins, vues de villes, de bâtiments, de ports et de paysages, la plupart magnifiquement réalisés par des artistes de renom, le portant ainsi à 50 volumes et plus de 2.400 cartes. L'un des ajouts les plus remarquables est un ensemble de quatre volumes de cartes manuscrites et de dessins topographiques, dont certains secrets, réalisés pour la Compagnie hollandaise des Indes orientales. Il fut l'un des rares citoyens à posséder ces volumes confidentiels. On ne sait pas s'il en fit profiter ses contemporains, mais il est certain qu'il le montra au moins à Cosme III de Medicis (1642 - 1723) qui en fait mention dans son journal le 2 janvier 1668. Inscrit au patrimoine *Mémoire du Monde* de l'UNESCO, l'ensemble forme, selon le site officiel (http ://portal.unesco.org/ci/fr/ev.php-URL_ID=14695&URL_DO=DO_TOPIC& URL_SECTION=201.html), une source inestimable d'informations, *non seulement pour la géographie et la topographie, mais aussi pour l'archéologie, l'architecture, la sculpture, l'ethnographie, le folklore, l'héraldique, la navigation, l'histoire des fortifications et de la guerre. Y figurent aussi des portraits de personnages célèbres, des inventions technologiques, des travaux publics et beaucoup d'autres aspects de l'histoire et de la culture du XVIIème siècle.* Il est conservé, en parfait état, à la Bibliothèque nationale autrichienne à Vienne après avoir miraculeusement échappé à un incendie en 1992.
Voir http ://cartography.geog.uu.nl/research/vanderhem.html

On doit à Christopher Saxton (Yorkshire, ca. 1542 - ca. 1610) un magnifique atlas de trente-cinq cartes en couleurs de l'Angleterre et du Pays de Galles dont la première édition date de 1579. Il fut réalisé sous l'impulsion de Thomas Seckford (Woodbridge, 1515 - janvier 1587), l'un des deux maîtres des cérémonies d'Élisabeth Ier (1533 - 1603). Saxton est considéré comme le père de la cartographie Outre-Manche et ses cartes furent reproduites pendant les deux siècles suivants sans que des modifications majeures y soient apportées. Elles servirent de base aux cartes qui viendront après. On peut voir certaines de ses cartes à l'adresse http ://special.lib.gla.ac.uk/exhibns/month/june2002.html.

Principal cartographe français du XVIIe siècle, Nicolas Sanson avait été remarqué, alors qu'il n'avait que 18 ans, par le cardinal de Richelieu (1585 - 1642) après la parution de sa carte de France. Il enseigna la géographie à Louis XIII, puis plus tard à Louis XIV. Cependant, son atlas du monde de 1658-1659 comportait des erreurs dans l'évaluation des angles ce qui conduisait à des erreurs dans le calcul des surfaces. Grâce à une nouvelle méthode de détermination de la longitude mise

au point par Jean Dominique Cassini entre 1679 et 1683, la précision des cartes ultérieures fut grandement améliorée par des mesures plus exactes des latitudes, des longitudes ainsi que de celles concernant les dimensions et la forme de la Terre.

Les premières cartes indiquant des déclinaisons magnétiques locales remontent à la première moitié du XVIIe siècle. Les courants marins apparaissent sur les cartes vers 1665. À partir de 1680, les Jésuites mènent à bien une grande opération de cartographie en Chine. Des cartes précises de l'Amérique voient le jour.

Il n'est pas possible de parler de l'histoire de la cartographie sans évoquer les globes du moine franciscain Vincenzo Maria Coronelli (Venise, 16 août 1650 - Venise, 9 décembre 1718). En 1678, celui-ci avait fabriqué deux globes d'un diamètre de 175 cm pour le duc de Parme. Le cardinal d'Estrées, ambassadeur de Louis XIV auprès du Saint-Siège, fut très impressionné et passa commande de deux autres globes au cartographe italien pour les offrir à son souverain. Coronelli s'installe à Paris en 1681 et, en deux ans, construit deux sphères, l'une terrestre et l'autre céleste, mesurant 382 cm de diamètre et pesant environ deux tonnes chacune. Le diamètre atteint 487 cm si l'on inclut les méridiens et les cercles d'horizon qui sont mobiles. Leur ossature est en bois recouvert d'une toile. Chaque globe est muni de deux trappes : une de visite et une d'aération. Avec leur mobilier de présentation, l'ensemble fait plus de huit mètres de haut. Chacun des mobiliers de bronze et de marbre, réalisé par l'architecte Jules Hardouin-Mansart (Paris, 16 avril 1646 - Marly-le-Roi, 11 mai 1708), à ne pas confondre avec son grand-oncle François Mansart (1598 - 1666), et le fabricant anglais d'instruments mathématiques et astronomiques Michael Butterfield (Angleterre, 1635 - 1724), pèse plus de quinze tonnes. Le globe céleste figure l'état du ciel le jour de la naissance de Louis XIV, le 5 septembre 1638. Il a été peint et enluminé par le peintre Jean-Baptiste Corneille (Paris, 2 décembre 1649 - Paris, 12 avril 1695). Les étoiles et les planètes y figurent ainsi que les constellations, dont les noms sont donnés en français, latin, grec ancien et arabe, et qui sont représentées sous forme d'animaux fantastiques, le tout dans un camaïeu de bleu. Le globe terrestre présente l'état des connaissances géographiques de l'époque. La Californie est encore une île. Il comporte plus de 600 cartouches explicatifs, parfois assez longs. Ces textes et les tracés cartographiques sont confiés à des spécialistes. Par exemple, le tracé du Mississippi est dû à Jean-Baptiste-Louis Franquelin (Saint-Michel de Villebernin, 16 mars 1650 - France, après 1712),

cartographe et hydrographe du Roi à Québec, et René Robert Cavelier de La Salle (Rouen, 22 novembre 1643 - Sud de la Louisiane, 19 mars 1687) qui avait exploré ces territoires. Ces deux globes de Coronelli sont maintenant exposés à la Bibliothèque François Mitterand à Paris.

Si vous en avez la possibilité, ne manquez pas de visiter le Musée des globes à Vienne, c'est le seul musée de ce type au monde. Deux globes de Coronelli, datés de 1693 et de seulement 15 cm de diamètre (ce qui est rare) y sont exposés et vous pourrez en voir quatre autres, de 110 cm de diamètre, à la Bibliothèque nationale autrichienne. Le musée possède aussi un globe de 37 cm de diamètre de Gemma Frisius, réalisé en papier mâché en 1536, ainsi qu'un globe terrestre (de 1541) et un globe céleste (de 1551) de Mercator, tous deux de 41cm de diamètre. Ce globe terrestre est le premier où sont représentées les lignes loxodromiques. Toutes sortes de globes sont également exposées : thématiques, de la Lune et des planètes, globes géants, de poche, gonflables (aérophyses), pliants, tournants, avec un mécanisme semblable à celui des parapluies, globes en relief dont l'un des plus anciens date de 1822 et est l'œuvre de Karl Wilhelm Kummer (1785 - 1855), un fabricant de Berlin.

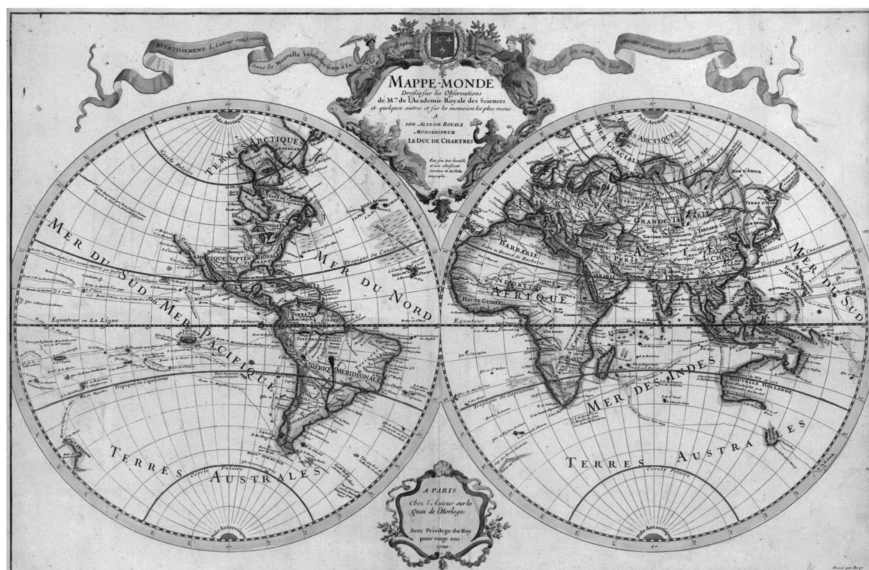
Du XVIe au XVIIIe siècle, le globe est l'attribut du savoir. On ne compte pas le nombre de portraits de navigateurs, d'astronomes, d'astrologues, de médecins, de naturalistes, de physiciens, de mathématiciens et même d'hommes de lettres, de souverains et de nobles, où figure un globe. Au siècle des Lumières, le globe est présent dans les cabinets de curiosité et de physique, aussi bien que dans les salons et les bibliothèques. N'était-ce que de la décoration ?

Les siècles suivants

Commençons pas une anecdote amusante (voir Biblio : Alinhac). François Chevalier (16 ? ? - 1748), qui sera nommé professeur au Collège de France en 1716, proposa, en 1707, que les cartes des paroisses soient dressées par les curés à l'aide d'un châssis orienté. Son idée fut reprise par Jean-Baptiste Bourguignon d'Anville. Le chassis était composé d'une feuille sur laquelle huit cercles concentriques, distants d'un quart de lieue, avaient été dessinés ainsi que huit rayons dirigés vers les points cardinaux et le levant et le couchant du Soleil aux solstices d'été et d'hiver. Les arcs compris entre les solstices comportaient des divisions intermédiaires allant de cinq jours en cinq jours. On fournissait au curé

un mode d'emploi et un tableau des signes conventionnels à utiliser. Il devait monter au clocher, fixer ce canevas sur une planchette, l'orienter suivant la position du Soleil correspondant à la date de l'observation et, à l'aide d'une règle en bois, il devait viser les principaux lieux et reporter les distances d'après ses propres estimations. Il traçait ensuite les rivières, les chemins, les bois et les limites en s'appuyant sur les détails mis en place. Ensuite un cartographe n'avait plus qu'à rassembler, raccorder et harmoniser les levés ainsi obtenus. On se doute bien que la précision n'était pas forcément au rendez-vous !

Cependant, au XVIIIe siècle, les principes scientifiques de la cartographie étaient bien établis et les inexactitudes les plus importantes portaient sur les régions inexplorées du Globe.



Mappemonde de Guillaume Delisle, 1707

Guillaume Delisle (Paris, 28 février 1675 - Paris, 25 janvier 1726) a laissé une œuvre importante, dont des globes. Ce cartographe est l'élève de Cassini. Il publie ses premières cartes en 1700. Elles intègrent les travaux des astronomes de la seconde moitié du XVIIe siècle et Delisle compile tous les livres de navigation et toutes les cartes qu'il peut trouver. Il aboutit ainsi à des cartes plus précises, qui surpassent toutes celles produites auparavant. En particulier, il utilise la même échelle pour des régions voisines les unes des autres. Il travaille sur tous les continents,

un par un, et sur la France. Sur les points litigieux, il indique ses sources directement sur la carte ou rédige des notes additionnelles qui existent encore dans les archives de l'Académie des sciences. Sa carte de 1700, révisée en 1707, fait apparaître pour la première fois le toponyme *Baie d'Hudson*, mais tout l'ouest de l'Amérique du Nord est laissé en blanc sauf la Californie. L'exhaustivité de sa topographie et le soin qu'il accorde à l'orthographe des noms sont restés célèbres. Il sera le professeur de géographie du jeune Louis XV. Ce futur roi a, en effet, bénéficié d'une instruction solide, non seulement en géographie mais aussi en astronomie, dont il était féru, en géométrie, en arithmétique, en navigation, en optique et en art des fortifications. Cette éducation orientera ses goûts et ses décisions.

Malgré les progrès de la cartographie, la production de globes est moins importante au XVIIIe siècle que pendant les siècles précédents. Aux Pays-Bas, Gerard Valk (Amsterdam, 1651/52 - Amsterdam, 21 octobre 1726) se distingue. En France, il faut attendre le seconde moitié du siècle pour voir des œuvres apparaître. Deux noms sont à mentionner. Didier Robert de Vaugondy (Paris, 1723 - Paris, 1786), géographe du roi Louis XV et du duc de Lorraine Stanislas Leszczyński (1677 - 1766), commence par aider son père, Gilles Robert Vaugondy (1688 1766) qui était le petit-fils du cartographe Nicolas Sanson, pour un *Atlas portatif universel et militaire*, publié en 1748 et 1749. Il est destiné à un large public et comprend 209 cartes. Puis, père et fils s'occupent de globes. En 1750, Didier Robert présente un globe au roi qui le nomme géographe ordinaire. Puis, Louis XV lui demande de construire un globe manuscrit de près de deux mètres et deux globes de 18 pouces (45,5 cm) pour la Marine. Le projet du grand globe, jugé trop dispendieux, est abandonné et les Vaugondy vendront les petits globes par souscription en 1753. Avant sa mort, Didier Robert collaborera à la fabrication d'un globe de 1,60 m sous la direction de dom Claude Bergevin (1743 - 1789). Commandé par Louis XVI, il était destiné à montrer les terres nouvelles découvertes par La Pérouse et Cook. Ce globe est conservé au château de Versailles. Louis-Charles Desnos (1725 - 1805), géographe du roi du Danemark, est connu pour son *Indicateur fidèle* (dont le titre complet est *Étrennes utiles et nécessaires aux commerçans et voyageurs ou Indicateur fidèle enseignant toutes les routes royales et particulières de la France, et les chemins de communication qui traversent les grandes routes : les villes, bourgs, villages, hameaux, châteaux, abbayes, hôtelleries, rivières, bois et les limites de chaque province, distinguées*), une sorte de guide de voyage

apprécié pour la qualité scientifique de ses cartes et sa mise en page, et qui connaît de nombreuses éditions entre 1764 et 1785.

Jean-Baptiste Bourguignon d'Anville s'était fait remarquer en dressant, à l'âge de quinze ans, en 1712, une carte de la Grèce ancienne suivie par une de la Gaule qu'il offre à Louis XV alors âgé de dix ans. À partir de 1746, il commence la production systématique de cartes des continents. Mais ce n'est qu'en 1761, alors qu'il a soixante-quatre ans, qu'il publie une mappemonde en deux hémisphères pour laquelle il utilise deux fois plus de points astronomiques que Delisle. Il la mettra à jour trois fois pour tenir compte des voyages de Bougainville et de Cook et modifier, selon des cartes russes, les détroits entre l'Asie et l'Amérique.

Une étape importance est franchie par Philippe Buache, dont il a déjà été question. Il fait la distinction entre la géographie physique « extérieure », qui traite de ce que nous voyons à la surface de la Terre, et la géographie « intérieure », qui concerne sa structure. Il s'occupe aussi de cartographie et, en 1737, il a l'idée de relier les cotes sous-marines entre elles pour créer les premiers isobathes (courbes de niveau joignant des points d'égale profondeur). Sa *Carte et coupe du canal de la Manche* sera gravée en 1752. Deux ans plus tard, il publie son célèbre *Atlas physique*. Il enseigna la géographie au futur Louis XVI et à son jeune frère, le comte de Provence, le futur Louis XVIII.

À la fin du XVIIIe siècle, plusieurs pays d'Europe entreprennent des levés topographiques détaillés de leurs territoires. Comme nous l'avons vu, Jean-Dominique Cassini I est chargé par Louis XIV d'établir une carte de France. Elle ne fut achevée qu'en 1815. Mais les travaux géodésiques et topographiques ne sont pas tout ; le cartographe doit également définir un symbolisme et nommer les lieux (la *toponymie*). Il faut ensuite éditer les cartes. À l'époque de Cassini de Thury, la France manque de graveurs. On doit en former. Le recrutement des ingénieurs pose également problème. Le travail avance lentement et, en 1756, sept ans après le début des travaux, seules douze planches sur cent quatre-vingts sont terminées. Faute d'argent, Louis XV annule sa mission. Cassini lance une souscription. Quand il meurt en 1784, le flambeau est repris par son fils mais les événements politiques interrompent l'entreprise alors qu'elle était presque achevée.

En 1737, le médecin et géologue britannique Christopher Packe (1686 - 1749) fait paraître la première carte géologique, celle du sud de l'Angleterre. Un *Institut cartographique national* voit le jour dans ce pays en

1791. La première carte climatologique sera établie par Heinrich Wilhelm Brandes (Groden près de Ritzbüttel, 27 juillet 1777 - Leipzig, 17 mai 1834) en 1820. En 1825, le marin et hydrographe français Louis Isidore Duperrey (Paris, 22 octobre 1786 - Paris, 25 août 1865) et le mathématicien et physicien anglais Peter Barlow (Norwich, 15 octobre 1776 - Woolwich, 1er mars 1862) dressent une carte des lignes, dites isogones, qui joignent des points de même déclinaison magnétique.

La cartographie militaire fera des progrès considérables sous l'Empire. Napoléon confie au baron Louis Albert Guislain Bacler d'Albe (Saint-Pol-sur-Ternoise, 21 octobre 1761 - Sèvres, 12 septembre 1824), un peintre qu'il avait remarqué pendant la campagne d'Italie, la réalisation d'une carte de l'Europe. Il accompagnera l'Empereur sur tous les champs de batailles, partageant sa tente, établissant la marche des différentes unités, envoyant ses ingénieurs à l'avant-garde pour dessiner à vue. Il en résultera une carte, la *Carte de l'Empereur*, en 420 feuillets de 80 cm sur 50 cm, au 1/100.000e, d'une étonnante précision, établie entre 1809 et 1812. Elle s'étendait du Rhin à la Dvina et de la Baltique au Tyrol. Malheureusement les coffres contenant ces cartes sombrèrent pendant le passage de la Bérézina du 26 au 29 novembre 1812. Nous reparlerons de lui plus loin.

L'idée d'une carte précise de la France remonte aux premières années de la Révolution. Napoléon reprit ce souhait et demanda au colonel Charles-Marie Rigobert Bonne (le fils de l'inventeur de la projection), d'étudier la question mais les événements politiques et militaires en décidèrent autrement. Sous la Restauration, Bacler d'Albe, devenu directeur du Dépôt de la guerre, reprit le projet de Bonne. Nouveaux contretemps politiques. En 1816, le colonel Brossier et le commandant Denaix présentent un mémoire très précis sur le travail à réaliser. Ils proposent de coordonner les efforts des différents services et d'exploiter et harmoniser les documents des diverses provenances. Ce projet, présenté au ministre de la guerre, reçoit un écho favorable à la Chambre des Pairs.

En 1817, Louis XVIII crée une *Commission royale de la carte de France* présidée par Laplace et composée de 14 membres provenant des différentes administrations. La France est divisée en grands quadrilatères séparés par des chaînes de triangles de premier ordre, puis d'ordre supérieur. Cette carte, dite d'État-Major, ne sera achevée que vers 1880, après bien des problèmes tant techniques, qu'administratifs ou finan-

ciers alimentés, en plus, par les rivalités entre les services concernés. En 1832, à la tribune, le général Marie (ou Marc) Jean Demarçay (Martaizé, 11 août 1772 - Paris, 22 mai 1839), qui siégeait à l'extrême gauche et était l'un de ses opposants les plus farouches, affirma même qu'elle était dangereuse pour la France car elle profiterait davantage à d'éventuels envahisseurs qu'aux armées françaises qui connaissaient parfaitement le terrain. Il fallut revenir à plusieurs reprises sur le choix de l'échelle, la question des hachures et de l'éclairement vertical ou oblique. Il serait fastidieux de raconter ici tous les obstacles qui durent être surmontés et toutes les péripéties du projet. La carte nécessita des efforts immenses, surtout en montagne. Elle comprend 273 feuilles couvrant chacune un rectangle de 64 km par 40 km et est au 1/80.000e. Pour la première fois, les signes conventionnels y sont uniformisés. Dans les régions accidentées, le relief est indiqué par un système de hachures qui suivent les courbes de niveau. Bien que la gravure se soit échelonnée sur 60 ans, la carte est d'une homogénéité remarquable. Mais, des erreurs importantes de planimétrie et de nivellement avaient été commises, surtout dans les régions accidentées. Pour les travaux de génie civil (ponts, routes, canaux, voies ferrées), la précision d'un ou deux mètres qu'elle donnait n'était pas suffisante. Cependant, l'énorme réduction des plans et leur assemblage sur une triangulation exacte, ainsi que les nombreux détails représentés, assuraient à l'ensemble une grande valeur pratique, bien supérieure à celle de la carte de Cassini. Un nivellement plus précis sera entrepris, à partir de 1884, sous la direction de Charles Lallemand.

La carte était gravée sur cuivre. On commençait par le tracé à l'envers de la projection et le report des points géodésiques. Ensuite, le trait était décalqué après vernissage et gravé à l'eau forte, puis repris au burin. Le figuré du terrain était la partie la plus longue et la plus délicate. Les courbes de niveau étaient décalquées et les hachures dessinées à l'aide de pointes à eau-forte de cinq grosseurs différentes. Les hachures fines étaient exécutées à la pointe sèche et les plus grosses reprises au burin pour les régulariser et leur donner plus de force. L'exécution complète d'une planche demandait entre 10 et 12 ans. Pour que la carte soit rentable, on avait décidé un tirage de 3.000 exemplaires à partir des cuivres originaux, puis un autre de 2.000 après leur réfection. Les feuilles les plus anciennes ne résistèrent pas et de gros frais durent être engagés pour leur restauration. Ainsi, celle de Paris dut être gravée une seconde fois. Les corrections, par la technique du repoussé, étaient ardues. Les procédés électrolytiques ne se mettront en place qu'à partir de 1852-1854. En

1838, le Dépôt de la guerre entreprit les premiers essais de report sur pierre. En 1850, plus d'un tiers de la France existait sur pierre et pouvait ainsi être vendu à bas prix. Mais cette édition lithographique, confiée à une entreprise privée, ne sera jamais complète et le report fut abandonné en 1872 alors que seulement 50 départements avaient été traités. Cependant, l'impression des pierres continua jusqu'en 1880 bien que le stockage et la manipulation de celles-ci posa d'importants problèmes lors de leur mise à jour (chacune pesait environ 225 kg). En 1877, le colonel Bugnot, directeur du Dépôt de la guerre, s'occupa du remplacement de la pierre par du zinc ainsi qu'Aloys Senefelder (Prague, 6 septembre 1771 - Munich, 26 février 1834), l'inventeur de la lithographie, l'avait préconisé dès 1818. Nous reparlerons plus loin de cette invention. Cette zincographie se révéla moins chère et plus rapide que la gravure sur cuivre et elle se développa rapidement. Elle donnait de moins bons résultats que le cuivre pour le tirage monochrome, mais offrait la possibilité d'obtenir des cartes polychromes. Mais devant un certain nombre de problèmes techniques, une nouvelle édition sur cuivre, par quarts de feuille au 1/80.000e, fut entreprise en 1889. En 1898, 965 quarts avaient été gravés. Au fur et à mesure, une édition au 1/50.000e en fut tirée par amplification photographique et photométallographie. Pendant la guerre de 1914-1918, on lui ajouta un pseudo-quadrillage Lambert et c'est sous cette forme qu'elle sera vendue au public jusqu'en 1958.

Après la déclaration de guerre en 1914, on s'aperçut que la projection de Bonne était inadéquate. En effet, c'était une projection équivalente, mais elle n'était pas conforme. Elle conservait les surfaces mais pas les angles. Or les artilleurs avaient besoin de tirer à vue. Le 18 juin 1915, le Service géographique de l'armée adopta donc la projection Lambert. Signalons, qu'en 1910, Cholesky, dont il sera longuement question plus loin, avait mis au point la méthode appelée de *double cheminement*.

L'*hydrographie* (topographie marine dont le but est de déterminer le relief sous-marin, la force des courants et des marées, afin d'établir des cartes marines) rencontre des difficultés spécifiques et, pour devenir précise, elle doit mettre en œuvre des techniques complexes de mesure astronomique des longitudes. Guillaume Brouscon, pilote du Conquet, publie, en 1548, un *Manuel de pilotage à l'usage des marins bretons* dans lequel on trouve des cartes des côtes de France avec des explications sur la navigation hauturière et la manière de déterminer la latitude par la hauteur du Soleil ou de l'étoile Polaire. Pierre Desceliers (Arques-la-

Bataille, ca. 1500 - Dieppe, ca. 1558), cartographe de l'école dieppoise du XVIe siècle, publie de nombreux portulans. Le premier atlas français de cartes nautiques, *Le Neptune françois*, sort des presses en 1693 sous l'impulsion de Colbert. Il contient vingt-neuf cartes qui vont de la Norvège à Gibraltar, dont la moitié concerne les côtes occidentales de la France (ce qui fera dire à Louis XIV que ses géographes lui ont pris plus de terrain que ses ennemis !). Elles ont été levées à la planchette et au graphomètre sur terre et à la boussole sur mer. La projection utilisée est celle de Mercator qui permet de tracer les itinéraires de façon rectiligne et de fixer le cap une fois pour toutes. Mais les marins préfèrent les cartes où les degrés de latitude gardent un écart constant. Le même reproche sera fait aux cartes de Jacques-Nicolas Bellin, le Vieux, (Paris, 1703 - Versailles, 21 mars 1772) auquel on doit *Neptune français* (1753), *Carte de l'Amérique septentrionale* (1755), *Hydrographie française* (1756), *Petit atlas maritime* (1764) et *Nouvelle méthode pour apprendre la géographie* (1769). Bien que critiquées, ces cartes serviront de base aux travaux ultérieurs comme ceux de Jean-Baptiste Nicola Denis d'Après de Manevillette (Le Havre, 11 février 1707 - Lorient, 1er mars 1780) qui publiera un *Neptune oriental* en 1745, puis corrigé en 1775. Signalons que Bellin est également l'auteur de 994 articles de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert.

Au début du XVIIIe siècle, les cartes du Pacifique comportent de nombreuses erreurs, en partie dues au manque d'informations. Il faut améliorer les bases de la navigation. L'astronome britannique Edmund Halley, bien connu pour la comète qui porte son nom, explore l'Atlantique Sud, établit en 1701 une carte générale des variations entre le nord véritable et le nord magnétique. Mais les variations de la boussole ne sont pas constantes et le problème n'est pas résolu. À cause du déchiquetage des côtes, la triangulation est difficile à réaliser. Il est nécessaire de disposer de comparaisons extrêmement précises entre le temps local, déterminé par le passage au zénith d'une étoile ou du Soleil, et celui du méridien d'origine. Ces comparaisons ne purent être réalisées qu'après l'invention et la mise au point du chronomètre de marine par John Harrison entre 1735 et 1757. Les conditions de navigation en furent bouleversées et la France et la Grande-Bretagne se lancèrent alors dans de grandes expéditions comme celles du capitaine James Cook (Marton, 27 octobre 1728 -Île s Sandwich, 14 février 1779) qui fut tué dans la baie de Kealakekua, aux îles Sandwich (Hawaii) lors de sa troisième expédition, le tour du monde de Louis Antoine de Bougainville (Paris,

11 novembre 1729 - Paris, 31 août 1811) entre 1766 et 1769 et le voyage de Jean François de Galaup, comte de La Pérouse (Albi, 23 août 1741 - disparu à Vanikoro, îles Salomon, après mars 1788) entre 1785 et 1788. À la fin du XVIIIe siècle, seules des zones blanches subsistaient autour des pôles et à l'intérieur des continents. Les voyages à caractère naturaliste allaient suivre dont celui d'Alexander von Humboldt et du botaniste français Aimé Bonpland (La Rochelle, 22 août 1773 - Santa Ana, Argentine, 4 mai 1858) qui dura de 1799 à 1804, ainsi que celui de Charles Darwin (Shrewsbury, Shropshire, 12 février 1809 - Down, Kent, 19 avril 1882) à bord du *Beagle* entre 1831 et 1836.

Parmi ces explorateurs, il en est un qui est particulièrement attachant. Il s'agit d'Antoine Thomson d'Abbadie d'Arrast, né à Dublin le 3 janvier 1810 et mort à Paris le 19 mars 1897. Il est Irlandais par sa mère et Basque par son père. Il revient en France à l'âge de dix ans. En 1835, il publie des études grammaticales sur la langue basque avec l'écrivain romantique basque Augustin Chaho (Tardets, 10 octobre 1811 - Bayonne, 23 octobre 1858). Toute sa vie, il sera un grand défenseur de cette culture et sera l'organisateur de grandes fêtes euskariennes (Urrugne 1851). Il était un grand admirateur de Chateaubriand dont, plus tard, il achètera la maison au 120, rue du Bac à Paris, où il finira d'ailleurs ses jours avant d'être inhumé en terre basque, dans une propriété dont nous reparlerons. Après des études à la Sorbonne, au Muséum d'histoire naturelle et au Collège de France, Arago l'envoie, en 1836, au Brésil pour mesurer les déviations de la verticale. Lors de son voyage d'aller, sur la frégate *Andromède*, il fait la connaissance du prince Louis-Napoléon Bonaparte qui part en exil aux États-Unis après son coup d'état manqué de Strasbourg. Puis, avec son frère Arnauld Michel (1815 - 1893), il explore l'Éthiopie de 1838 à 1849 et y effectue de nombreuses mesures topographiques. Il utilise pour cela un matériel simplifié et facilement transportable. C'est ce qu'il nomme la « géodésie expéditive » qui *consiste à prendre pour sommets des triangles, les stations offertes par les hasards du voyage, à opérer sur des bases obtenues rapidement, à employer les signaux naturels et enfin à identifier ces signaux par des combinaisons d'altitudes fournies par leurs apozéniths observés.* Pour appliquer sa méthode, il créé, sous le nom d'*Aba*, un théodolite nouveau qui sera adopté par l'explorateur et administrateur colonial portugais Alexandre Alberto da Rocha de Serpa Pinto (Tendais, 20 avril 1846 - Lisbonne, 28 décembre 1900). Les résultats donnés par cette géodésie expéditive ne s'écartent que de quelques dizaines de

kilomètres en longitude et de quelques kilomètres en latitude. L'altitude du point culminant est exacte à une vingtaine de mètres près. De plus, Antoine d'Abbadie effectue systématiquement un calcul d'erreurs. Il a ainsi réalisé une triangulation qui couvre une superficie supérieure à celle de la France. Il publie une dizaine de cartes couvrant 300.000 km^2. En projection de Mercator, elles seront très utilisées plus tard par les armées italiennes lors de la campagne d'Éthiopie. Il fait paraître un monumental ouvrage sur cette région ainsi qu'un catalogue de manuscrits éthiopiens (1859) et un dictionnaire amharique-français. Lors de leur séjour, les frères d'Abbadie découvrent les sources du Nil bleu (18 janvier 1846). D'autres voyages suivent. Antoine est élu à l'Académie des sciences et se fait construire une demeure néogothique, *Abbadia*, entre Hendaye et Saint-Jean-de-Luz par Viollet-le-Duc. Elle comprend un observatoire et une chapelle. C'est Louis-Napoléon Bonaparte qui, devenu entre-temps Napoléon III, doit en poser la dernière pierre, mais 1870 arrive et les événements en décident autrement. Par testament, d'Abbadie fera don de son château à l'Académie des sciences. (Biblio, voir : Darboux, Poignant, Poirier). À cette époque, les récits des voyages terrestres se multiplient, apportant des contributions non négligeables à la cartographie, souvent seulement sous forme de simples itinéraires, cependant précieux. Mais ceci est une autre histoire.

Le 17 décembre 1837, alors qu'il commandait le trois-mâts *Cabot* entre Charleston en Caroline-du-Sud et Greenock en Écosse, le capitaine de vaisseau américain Thomas Hubbard Sumner (Boston, 20 mars 1807 - Taunton, Massachussets, 9 mars 1876) avait calculé la position de son navire à partir de la longitude estimée et de l'observation d'une étoile. Il l'avait reportée sur sa carte. Mais, n'étant pas certain de sa mesure de longitude, il calcula à nouveau sa position en prenant une latitude plus faible puis une supérieure. Les trois points étaient alignés ! Il refit les mêmes opérations avec une autre étoile et obtint, de nouveau, trois points alignés. Cette seconde ligne coupait la première et l'intersection indiquait la position exacte du navire. Il comprit qu'une seule observation d'un corps céleste déterminait la position d'une droite sur laquelle se situait l'observateur. Il n'avait plus besoin d'une mesure exacte de la longitude. C'est la méthode des *droites de hauteur*. Elle nécessite une connaissance très précise de l'instant d'observation. Elle fut améliorée en 1875 par le capitaine de frégate Adolphe Laurent Anatole Marcq de Blond de Saint-Hilaire (Crécy-sur-Serre, 29 juillet 1832 - Paris, 30 décembre 1889) qui recourut à une simplification, la *méthode du point*

approché, pour la déterminer puis, en 1883, par Philippe Eugène Hatt (Strasbourg, 17 juillet 1840 - 9 octobre 1915). Quelques variantes furent ensuite apportées par Louis Eugène Napoléon Favé (Paris, 18 juillet 1853 - 30 juillet 1922), le lieutenant de vaisseau (qui deviendra vice-amiral) Édouard Jean Pierre Marie Sylvain Perrin (Lyon, 24 février 1852 - Paris, 28 février 1926) et François Auguste Claude (1858 - Paris, 5 juillet 1938), l'inventeur de l'astrolabe à prime. C'est la seule méthode astronomique utilisée jusqu'à nos jours.

Thomas Hubbard Sumner (Boston, 20 mars 1807 Taunton, 9 mars 1876) était le fils de Thomas Waldron Sumner (1768 - 1849), un architecte, et d'Élizabeth, fille de Thomas Hubbard, de Weston dans le Massachusetts. Ils étaient onze enfants dont quatre moururent en bas âge et il resta le seul fils. Il entra à Harvard à l'âge de 15 ans. À sa sortie, peu après ses 19 ans, il se maria, partit pour New York et divorça au bout de trois ans. Il s'engagea alors comme marin sur un bateau faisant du commerce avec la Chine. Huit ans plus tard, il s'était élevé au grade de capitaine et commandait son propre navire. Le 10 mars 1834, il se maria avec Selina Christiana Malcolm, du Connecticut, qui lui donna six enfants dont deux disparurent dans leur enfance. C'est le 25 novembre 1837, alors qu'il entrait dans le canal Saint-Georges et la mer d'Irlande, qu'il eut l'idée de la droite de hauteur. Il lui fallut cependant quelques années pour la perfectionner et la publier sous la forme d'un petit opuscule intitulé *A New and Accurate Method of Finding a Ship's Position at Sea, by Projection on Mercator's Chart*, en juillet 1843. L'importance de cette méthode fut immédiatement reconnue et une copie de son livre fut fournie à chaque navire de l'U.S. Navy. Peu après, son esprit se troubla et, en 1850, il fit un séjour à l'asile McLean de Boston. Son état se dégrada peu à peu et, en 1865, il fut interné au Lunatic Hospital de Taunton, Massachusetts, où il mourut à 69 ans.

Joseph Bernard, marquis de Chabert de Cogolin (Toulon, 28 février 1724 - Paris, 1er décembre 1805), publie en 1753 son ouvrage *Voyage fait par ordre du roi en 1750 et 1751, dans l'Amérique septentrionale, pour rectifier les cartes des côtes de l'Acadie, de l'Isle Royale & de l'Isle de Terre-Neuve ; et pour en fixer les principaux points par des observations astronomiques* après s'être rendu compte, lors de deux campagnes en Acadie, des imprécisions des cartes marines. Il érige le premier observatoire du Canada. Puis il s'attaque à la Méditerranée et présente à l'Académie des sciences, où il avait été élu en 1758, un *Projet d'observations astronomiques et hydrographiques pour parvenir à former pour la*

mer Méditerranée une suite de cartes exactes, accompagnées d'un portulan, sous le titre de Neptune Français, 2e volume, publié en 1766. En 1776, il devient directeur du Dépôt de la marine puis se distingue pendant la guerre d'indépendance des États-Unis. Le 5 septembre 1781, il est gravement blessé lors d'un engagement contre cinq navires de ligne de la flotte de Thomas Graves (1725 - 1802) à la célèbre bataille de la Chesapeake. Il est promu chef-d'escadre en 1782, puis vice-amiral en 1792. La Révolution le force à émigrer en Angleterre ; il rentre en France en 1802 et est nommé au Bureau des longitudes.

Charles-François Beautemps-Beaupré, devenu ingénieur en 1785, est l'auteur des cartes du *Neptune de la Baltique.* Puis, en 1791, il s'embarque sous les ordres d'Antoine Raymond Joseph de Bruni (ou Bruny), chevalier d'Entrecasteaux (Aix-en-Provence, 8 novembre 1737 - Océan Pacifique, 20 juillet 1793) comme ingénieur hydrographe, pour aller à la recherche de La Pérouse dont on avait perdu la trace depuis 1788. Il en profite pour réaliser des levés des côtes des pays visités, expérimente de nouveaux instruments, comme le cercle à réflexion de Jean-Charles de Borda, ébauche de son cercle répétiteur, et fixe les fondements de l'hydrographie. Rentré en France en 1796, il est nommé en 1799 sous-conservateur du Dépôt des cartes et plans de marine. Il commence la reconnaissance du littoral français. Nommé, en 1814, ingénieur hydrographe en chef, il dirige jusqu'en 1838 la rédaction des nouvelles cartes des côtes de la France. Son *Le Pilote Français*, imprimé en 1844, contient de 150 cartes et plans, 279 vues et 184 tableaux des hautes et basses marées. Cette œuvre fait encore l'admiration du monde maritime. On peut considérer Beautemps-Beaupré comme le père de l'hydrographie moderne.

En 1891, le Congrès international de géographie propose de créer des cartes couvrant le monde entier à l'échelle de 1/1.000.000e, travail qui n'est pas encore terminé. La première édition de la carte générale des océans, due au prince Albert Ier de Monaco (Paris, 13 novembre 1848 - Paris, 26 juin 1922), paraît en 1904.

Au cours du XIXe siècle, la cartographie bénéficie d'importantes innovations techniques. La fabrication industrielle du papier commence à être rentable aux alentours de 1800. La presse d'imprimerie à vapeur se répand. Vers 1820, la lithographie, inventée par l'allemand Aloys Senefelder en 1799, fait son apparition en cartographie, permettant d'apporter facilement des modifications directement sur la pierre sans tou-

cher à la planche originale. Vers le milieu du XIXe siècle, on grave les planches sans les imprimer, elles servent uniquement de matrice pour le report. Dans les années 1830, la cérographie (gravure à l'encaustique) est expérimentée aux États-Unis. Vers 1840, l'invention de la *galvanoplastie* permet la mise à jour des plaques de cuivre par simple électrolyse sans altérer les plaques de cuivre initiales. Grâce à l'utilisation de plusieurs pierres, la lithographie en couleurs prend une place importante, permettant ainsi de mettre en valeur certaines caractéristiques particulières. C'est le début d'une cartographie thématique : routes, voies de navigation, ponts, chemins de fer, météorologie, hydrologie, botanique, géologie, zoologie, ethnographie, etc. Pour pallier à la manipulation des lourdes pierres (200 kg) que nécessite la lithographie, l'imprimeur parisien Léon Monrocq invente, vers la fin du XIXe siècle, la *zincographie*, gravure sur zinc dont les plaques incassables ne pèsent que 4 kg. Puis c'est la photographie aérienne qui se développe pendant la Première Guerre mondiale. Les premières photographies aériennes avaient été prises le 24 avril 1909 par Wilbur Wright (Millville, Indiana, 16 avril 1867 - Dayton, Ohio, 30 mai 1912), le pionnier de l'aviation américaine avec son frère Orville (19 août 1871 - 30 janvier 1948), alors qu'il survolait le camp militaire de Centocelli près de Rome (le film est visible sur le site http ://www.europafilmtreasures.fr/PY/322/voir-le-film-un_voyage_en_aeroplane_avec_wilbur_wright_a_rome). Viennent ensuite les satellites artificiels à partir de 1966 avec le lancement du satellite Pageos. Puis, dans les années 1970, avec les trois satellites Landsat, les États-Unis entreprennent un levé géodésique complet de la Terre. La France, à partir de 1986, lance les satellites SPOT qui permettent de distinguer des détails de 10 mètres. Malgré ces immenses progrès, des parties importantes de la surface de la Terre n'ont pas encore fait l'objet d'un relevé précis.

L'installation de câbles télégraphiques est à l'origine de la cartographie des fonds océaniques (les courbes d'égale profondeur, similaires aux courbes de niveau terrestres, s'appellent *isobathes*). Les premières cartes réalisées datent des années 1848-1860 et concernent le golfe Persique. Des sondages au fil sont également effectués par le *Dolphin* dans l'Atlantique Nord en 1851-1852. En 1899, le Congrès de géographie de Berlin institue une commission internationale pour étudier et publier une carte des profondeurs de l'ensemble des mers et océans. Entreprise sous la direction de Julien Olivier Thoulet (Alger, 6 février 1843 - Paris, 2 janvier 1936), professeur à l'université de Nancy, pionnier de l'océanographie,

et financée par le prince Albert Ier de Monaco (Paris, 13 novembre 1848 - Paris, 26 juin 1922), la *Carte générale bathymétrique des océans* paraît en 1905 pour la première fois. Des sondages acoustiques sont utilisés. Mais la carte nécessite des corrections de pente et des corrections de vitesse du son car cette dernière dépend des variations de température, de salinité et de pression dans les différentes couches marines. Avec l'amélioration des techniques et des instruments, la carte aura plusieurs éditions dont les dernières ne seront pas achevées. Dans les années 1950-1960, Maurice William Ewing (Lockney, 12 Mai 1906 - Galveston, 4 mai 1974), directeur du Lamont Doherty Geological Observatory de l'université Columbia de New York, lance un grand programme d'étude du fond des océans. Il charge Bruce Charles Heezen (Vinton, 11 avril 1924 - décédé à bord d'un sous-marin près de l'Islande, 21 juin 1977) et Marie Tharp (Ypsilanti, 30 juillet 1920 - Nyack, 23 août 2006) d'établir des cartes à partir des sondages bathymétriques obtenus lors de campagnes océanographiques dans l'océan Atlantique. La technique utilisée est celle du dessin en perspective mettant ainsi en valeur les grandes structures présentes au fond des océans. En 1959, une carte du fond de l'Atlantique Nord est publiée. Elle montre une longue chaîne montagneuse sous-marine, la dorsale médio-atlantique, creusée, en son centre, par un fossé large de quelques kilomètres, le rift. Cette carte majeure contribuera à l'élaboration de la théorie de la tectonique des plaques. À l'heure actuelle, on procède par altimétrie spatiale. La géométrie de la surface océanique au repos reflète en effet en partie la topographie sous-marine à cause des variations infimes de la force de gravité à la surface du Globe. À partir de la mesure des ondulations de la surface océanique depuis l'espace, les géophysiciens sont capables de réaliser une cartographie des reliefs sous-marins.

Jusque vers 1985, les rôles des divers spécialistes de géodésie, de topographie et de cartographie étaient clairement identifiés. Les géodésiens effectuaient les observations détaillées et les calculs qui définissaient la forme fondamentale de la Terre et celles des pays. À partir de ces informations, les topographes mesuraient les détails au sol ou des photogrammètres analysaient les photographies aériennes. Ces mesures permettaient aux cartographes d'établir des cartes alliant une grande élégance graphique à une présentation efficace. Chacun trouvait ensuite lui-même dans la carte ce qu'il cherchait.

L'essor de l'informatique a complètement bouleversé cet ordonnancement. Les premiers travaux semblent être dus à des météorologistes

et des biologistes du sud de l'Angleterre. Mais les avancées majeures furent effectuées par des équipes de recherche, l'une britannique, l'Experimental Cartography Unit, entre 1968 et 1973, l'autre de l'université de Harvard à peu près à la même époque.

L'ordinateur ne sert plus simplement à tracer des cartes, mais il sert aussi à vérifier la qualité des données, à éliminer automatiquement les distortions dans les photographies aériennes et satellitaires, à rechercher les informations intéressantes et à présenter les résultats de la manière choisie par l'utilisateur.

Une grande partie du travail hautement qualifié est maintenant réalisé par les satellites du *Global Positioning System* (GPS) et les nouveaux appareils de prospection. Un nouvel outil, le *Système d'Information Géographique* (SIG), a vu le jour. Un SIG est un système informatique qui permet d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées et de produire des plans et cartes (leur fonctionnement est décrit dans plusieurs sites internet). Le premier SIG fut créé au Canada en 1965 à l'occasion d'un inventaire de la faune et de la flore du pays tout entier. Il en existe maintenant des dizaines de milliers dans le monde et leur nombre s'accroît d'environ 20 % par an. De nombreuses entreprises créent des logiciels et les adaptent aux besoins des clients. Les SIG peuvent accomplir des tâches aussi diverses que la commercialisation d'un produit vers un public bien défini, l'archivage de la description de tous les câbles électriques d'un pays, l'enregistrement de toutes les transactions foncières ou la modélisation du réchauffement planétaire. Ce sont les seuls outils qui peuvent intégrer des informations provenant de sources très différentes et les traiter dans le sens voulu par l'utilisateur. L'un des derniers satellites en date est le GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) qui a été lancé le 17 mars 2009 du cosmodrome de Plesetsk, en Russie. Son but est de cartographier le champ de gravité terrestre.

Et que dire de la cartographie de la Lune, des planètes et des systèmes stellaires !

Le langage cartographique

De même qu'il faut savoir lire un texte, il faut savoir lire une carte. Pour savoir lire, il faut avoir appris à lire, que ce soit l'écriture ou une carte. Mais, pour cela, il est nécessaire que l'écriture, les lettres, les

signes typographiques aient été préalablement inventés, les conventions et la nomenclature définies. C'est un point commun aux textes et aux cartes. La cartographie est bien une sorte d'écriture et les signes utilisés pour désigner un château, une église, ceux pour rendre compte du relief ont dû être forgés tout au long des siècles.

La plus ancienne représentation d'un paysage montagneux se trouve sur un papyrus conservé au Musée égyptien de Turin. Il date de la période de Séthi Ier, le père de Ramsès II, qui régna de 1291 à 1278 av. J.-C. Il s'agit d'une ébauche de la position des mines d'or de Nubie. Les montagnes sont figurées en coupe verticale et sont reparties de part et d'autre du chemin. Dans les illustrations anciennes, dès l'époque babylonienne, les montagnes ont, la plupart du temps, la forme de taupinières vues de profil. Les vallées sont symbolisées soit par des rangées de monticules perpendiculaires à leur axe, soit par des collines empilées les unes sur les autres lorsqu'elles sont dirigées face à l'observateur.

Une véritable cartographique du relief n'apparaît qu'au XVe siècle. Les montagnes sont dessinées en *perspective cavalière*, c'est-à-dire selon une projection oblique, à partir d'un point de vue situé bien audessus d'elles. Cette représentation ne présente pas de point de fuite et, par conséquent, les dimensions des objets ne diminuent pas avec leur éloignement. Deux des axes sont orthogonaux alors que le troisième est incliné, en général de 30° ou de 45° par rapport à l'horizontale, et est appelé l'*angle de fuite*. Cette perspective donne seulement une indication sur la profondeur, mais ne prétend pas donner l'illusion de ce qui peut être vu. On différencie chaque montagne des autres et, dans sa globalité, le terrain semble cohérent. Des lignes de pente et un ombrage en hachures accroissent l'impression de relief. Ces cartes sont très esthétiques, voire artistiques, mais manquent de précision.

La première représentation verticale est due à Hans Conrad Gyger (Zürich, 22 juillet 1599 - Zürich, 25 septembre 1674). Il en fait usage, en 1664, dans une carte de presque 5 m^2 des environs de sa ville natale où il combine une représentation topographique précise avec un effet artistique certain. Ses montagnes, dessinées en couleur dans le plan, offrent un effet saisissant de réalisme en trois dimensions. Sa carte n'eut cependant que peu d'influence sur la cartographie de l'époque car protégée par le secret militaire. La cartographie en relief restera inchangée jusqu'au XIXe siècle.

L'estompage, qui a longtemps été utilisé, consiste à reconstituer les ombres dues au seul relief (on omet donc celles qui proviennent des

forêts et des constructions), mais sans y ajouter les ombres portées. On simule un éclairage provenant du nord-ouest et incliné soit à 45° soit à 35°15′ par rapport au plan horizontal. Afin de rendre le terrain orienté parallèlement à cette source de lumière, on fait varier son orientation de part et d'autre de la direction théorique. Cette technique fournit une bonne appréciation relative des pentes et des caractéristiques générales du relief. Il suggère correctement la forme des parties ombrées mais les versants éclairés semblent plats. De plus, il n'a aucune précision. Cependant, il peut servir à intensifier les effets des différentes couleurs que l'on utilise selon l'altitude (appelées *teintes hypsométriques*) dans les cartes physiques.



Carte de Hans Conrad Gyger, 1664

Les courbes de niveau, qui relient par un trait continu les points de même altitude, fournissent une représentation géométrique du ter-

rain et permettent une bonne appréciation du relief. Lorsqu'elles sont tracées à des altitudes équidistantes (par exemple de 20 m en 20 m en montagne), elles sont plus serrées sur un terrain pentu et plus lâches quand il devient plus plat. Elles ont été imaginées par l'ingénieur et cartographe hollandais Nicolaus Samuelis Cruquius (Vlieland, 2 décembre 1678 - Spaarndam, 5 février 1754) en 1729. Certains accidents du terrain, qui doivent figurer sur une carte car ils fournissent des points de repère, peuvent cependant échapper à ces techniques. On ajoute alors un figuré particulier ou on accentue la représentation initiale en décalant, par exemple, la source de lumière ou en ajoutant des courbes de niveau. (voir Biblio : P. Monier).

Selon le général Henri Marie Auguste Berthaut (Épinal, 1er janvier 1848 - Paris, 18 décembre 1937) qui dirigea le Service géographique de l'armée de 1903 à 1911, la carte de Cassini est inapte à représenter le relief. Il écrit

> *Les hachures, supposées suivant les pentes, ne sont d'accord ni avec leur raideur, ni avec l'importance des différences de niveau, ni avec les formes du sol. Elles n'expriment guère le terrain, à la manière d'un esquisse très grossière, que lorsqu'il s'agit des vallées d'érosion ouvertes dans l'épaisseur d'un plateau.*

Aucune cote n'est indiquée sur les cartes anciennes. Les instruments ne faisaient pas défaut, mais aucun nivellement général n'avait pas été conduit. Des mesures précises des cotes ne seront entreprises que lorsqu'il s'agira de remplacer les plans-reliefs par des plans où l'on pouvait comprendre le relief au premier coup d'œil. En 1764, on met en place ce genre d'enseignement à l'École du génie de Mézières. Dix ans plus tard, l'*Atlas des places fortes du royaume* paraît. Pendant l'Empire, les militaires s'aperçoivent qu'il est indispensable de simplifier et d'uniformiser les signes et les conventions utilisés dans les différentes cartes. Dans ce but, la *Commission de topographie*, formée de vingt et un membres choisis parmi les différents services de l'État, est créée en 1802. Elle écarte les vues en perspective et l'estompage, leur préférant les hachures dans le sens de la plus grande pente et plus ou moins resserrées selon celle-ci, avec un éclairage oblique afin d'améliorer l'effet de relief. Il ne semble pas facile de savoir qui, le premier, eut l'idée de telles hachures. Leur introduction vint graduellement. Elles apparaissent en 1743 dans la *Philosophico-Chorographical Chart of Kent* de

Christopher Packe, ainsi que dans les cartes des rivières et bassins de Philippe Buache en 1757. L'épaisseur des lignes indique l'importance de la pente. En 1799, Johann Georg Lehmann (Johannismühle, 11 mai 1765 - Dresde, 6 septembre 1811) développe le premier système scientifique de représentation du relief par des lignes parallèles en combinant une épaisseur des lignes proportionnelle à la pente et un intervalle entre elles qui lui est inversement proportionnel. D'abord simple soldat dans un régiment d'infanterie, puis officier topographe, il fut nommé, en 1798, professeur à l'École militaire de Dresde et devint ensuite directeur du Dépôt des cartes et plans de cette ville. Il a effectué de nombreux levés dans l'Erzgebirge, en Saxe et en Pologne, et a dressé des cartes très exactes de ces différentes régions, ainsi que des plans de Varsovie et de Dresde. Quatre règles doivent être observées : la direction des hachures suit la ligne de plus grande pente, les hachures doivent être placées en rangées autour des courbes de niveau laissées en blanc, la longueur d'une hachure correspond à l'intervalle entre deux courbes de niveau, plus la pente est grande et plus la couleur doit être foncée.

De telles hachures sont utilisées depuis la fin du XVIIIe siècle pour les cartes du Dépôt de la marine. Charles-François Beautemps-Beaupré, dont il a été question auparavant, les emploie pendant le Consulat et l'Empire et il obtient des cartes très expressives de la côte d'Istrie. La Commission adopte aussi, pour la première fois, que soient portées des cotes par rapport au niveau de la mer, mais écarte l'idée des courbes de niveau, jugées trop lentes et trop coûteuses alors que le Génie les emploie depuis un an déjà. Ses conclusions sont soumises à l'approbation d'artistes et de scientifiques. Mais les préceptes énoncés ne furent pas appliqués partout. Le principal reproche que l'on pouvait faire à ces recommendations concernait la manière d'éclairer le terrain, ainsi que le note Louis Puissant dans son *Traité de topographie, d'arpentage et de nivellement* paru en 1807. Certains préconisaient d'éclairer le terrain perpendiculairement à sa surface au lieu d'utiliser une demi-perspective. (voir Biblio : O. Chapuis).

La nouvelle carte de France, dite *Carte d'État-Major*, est mise en chantier en 1818. En 1823, la Commission de topographie, dirigée par le lieutenant-colonel Puissant, clarifie les procédés destinés à représenter le relief : un semis de point cotés, des courbes de niveau équidistantes de 5 m, des hachures. Pour les points cotés

> *Il faudra que l'ingénieur détermine ces cotes de niveau sur les points culminants, dans les fonds, sur les bords et aux*

sources des eaux courantes et stationnaires, aux carrefours des routes, au bas et au sommet des côtes sur les mêmes routes, et partout où elles peuvent être nécessaires pour la plus grande intelligence des mouvements du terrain et de l'inclinaison des pentes diverses.

En ce qui concerne les hachures

Ce sera à l'intelligence de l'ingénieur à faire le choix des détails qu'il faudra omettre ou conserver. Il omettra, dans certains cas, des pentes faibles qu'il devra indiquer dans d'autres, dans l'intention toujours de conserver l'ensemble et l'esprit des formes du terrain.

L'écartement des hachures est fixé au quart de leur longueur qui est délimitée par deux courbes de niveau. Ainsi, plus la pente est forte, plus les hachures sont courtes et serrées. Le respect rigoureux de cette règle permet de retrouver le tracé des courbes de niveau à partir des hachures. La densité du trait est ainsi directement liée à l'intensité de la pente. Mais lorsque la pente est très forte le dessin des hachures devient impossible et l'on adopte alors les directives différentes dont l'utilisation du *diapason* du colonel Bonne qui permet à l'ingénieur de disposer, à tout instant, d'un modèle de hachures type, conçu de telle sorte que l'intensité de la teinte soit proportionnelle à la pente. Tout à fait approprié aux pentes moyennes, ce diapason avait l'inconvénient d'un rendu trop contrasté entre les zones de plaines (presque vides) et les zones montagneuses (de lecture difficile à cause d'une trop grande densité des hachures). Après de nombreuses modifications, c'est finalement le diapason, dit *diapason français*, mis au point par le colonel et daguerréotypiste amateur Paul-Michel Hossard (Angers, 15 mai 1797 - Jarzé, 1862) qui est adopté.

Quant aux objectifs assignés à cette nouvelle carte, ils sont clairs

C'est principalement sur les bords des grandes rivières, sur les côtés des routes jusqu'à un quart de distance, que le figuré doit être le plus soigné, afin de servir avec succès aux opérations militaires d'attaques et de défenses. Les cotes de niveau, çà et là sur les berges de rivières ou sur les hauteurs qui les avoisinent et les dominent, sont surtout nécessaires pour indiquer comment et de combien les rives se commandent, car le dessin laisse toujours de l'incertitude à cet égard.

Mais certains ingénieurs lèvent à vue les courbes de niveau, tandis que d'autres réalisent des mesures précises. Les années qui suivent 1823 voient donc une divergence d'opinion. La Commission de Topographie se réunit le 25 février 1826. Une technique inédite est proposée : il s'agit du procédé des hachures horizontales qui repose sur une multitude de courbes de niveau de même épaisseur avec une faible équidistance de sorte qu'elles forment des teintes. Plusieurs points de vue s'affrontent. Les décisions ne sont prises qu'en 1827. Pour les minutes, la Commission approuve l'utilisation des courbes de niveau dont l'équidistance devra être respectée sur une même carte ; elles seront fournies sur un calque séparé. Pour la mise au net avant gravure, des hachures seront ajoutées aux courbes de niveau et leur exécution sera centralisée à Paris. Mais, en 1830, des problèmes persistent toujours. Le 22 janvier 1838, le général Jean-Jacques Germain Pelet-Clozeau (Toulouse, 15 juillet 1777 - Paris, 20 décembre 1858) demande à la Commission de classer les douze meilleurs levés par ordre de mérite. Une méthodologie s'en suit. Les officiers doivent emporter avec eux des modèles de terrain pour aider à la mise en place des courbes. Des calques de courbes font leur apparition sur certains levés et permettent de dissocier le modelé du terrain de la planimétrie. Des précisions sont apportées sur le choix des points cotés qui doivent se trouver le long de tous les décrochements de terrain mais aussi au niveau des dépressions. Le 15 mars 1851, une instruction générale est transmise à tous les topographes de la carte, ce sera la dernière. Les derniers levés sont effectués au début des années 1860 et la carte publiée en 1875 pour la France continentale, en 1878 pour le comté de Nice, et en 1880 pour la Corse.

La cartographie urbaine

La cartographie urbaine peut répondre à plusieurs objectifs et donc présenter des aspects divers. Il peut s'agir de simplement donner une image globale d'une ville, de la montrer, de la « faire voir », une sorte de portrait. Ce peut être un plan topographique destiné à se repérer et à se déplacer ; il s'agit de voirie. Certains plans sont cadastraux et mettent donc l'accent sur le parcellaire en vue de délimiter les propriétés et de régler les problèmes fonciers. Des plans ont trait aux bâtiments et aux monuments, d'autres concernent les espaces libres privés, les jardins, les terrains maraîchers et les forêts. Il y a des plans analytiques ou thématiques qui cherchent à présenter certaines caractéristiques précises

de la ville comme les immeubles qui perdent de l'énergie ou le sous-sol (la cartographie souterraine a de nombreuses applications, non seulement en ville, mais plus généralement). D'autres enfin servent à visualiser des projets d'urbanisme avant leur réalisation. Le mode graphique et la typologie peuvent dépendre du type de plan et de son but. Pour lever le plan d'une ville, on trace une ligne directrice dans chaque rue. On obtient ainsi un canevas polygonal. Les directrices doivent être rattachées soigneusement les unes aux autres et elles permettent de lever les limites de chaque rue. Le tracé polygonal présente des difficultés lorsque les rues sont étroites et tortueuses, mais on cherche cependant à mener les directrices les plus longues possibles. Pour les villes très étendues, on emploie la triangulation pour relier entre eux les points principaux. Pour les îlots de maisons, on emploie une méthode de cheminement. On procède par rayonnement lorsque plusieurs rues convergent en un même point. Les angles sont mesurés à l'aide d'instruments goniométriques.

Les plans restés manuscrits sont rares. En effet, le levé et le dessin d'un plan constituent une entreprise tellement lourde que la diffusion (souvent mal connue) doit être suffisamment large pour en assurer la rentabilité. Il est donc nécessaire de les graver. Dans un premier temps, ce sont les commandes officielles qui ont dominé. Ces plans sont, en général, dédiés à quelqu'un bien qu'il soit souvent impossible de savoir si la dédicace s'adresse réellement au commanditaire, ou si elle est de circonstance pour s'attirer les faveurs d'un puissant. Plus tard, certains plans, comme celui de l'abbé Delagrive dont il va être question, sont établis par souscription publique lancée par leur auteur. Il faut attendre le XIXe siècle pour que l'administration française se remette sur les rangs. Il est également nécessaire de distinguer les levés originaux du réemploi d'un fond topographique.

La représentation de la ville peut être oblique (c'est la *vue cavalière* ou *à vol d'oiseau*), et en permettre une visualisation concrète, ou purement verticale (c'est le *plan géométral*), et n'en fournir qu'un plan. La vue cavalière est plus symbolique que pratique. On y voit les bâtiments sur un ou deux niveaux, d'où l'appellation de *plan en élévation*, ce qui nécessite certaines connaissances en perspective, en particulier en *axonométrie* (représentation par projection d'une figure à trois dimensions où seuls les angles sont déformés, les dimensions linéaires restant proportionnelles entre elles), mais réclame un moins grand nombre de mesures sur le terrain. Il est donc naturel que des dessinateurs et des peintres s'y soient intéressés. Le choix de l'angle de vue est important. Les édifices

sont mieux vus sous un angle oblique, tandis qu'un angle voisin de 90° conserve la précision topographique et les véritables dimensions. Dans certains plans, plusieurs angles sont même utilisés conjointement, ce qui permet de mieux rendre l'effet de perspective et d'éloignement. Le plan géométral est un simple instrument de connaissance ; c'est l'œuvre d'un cartographe ayant une certaine maîtrise des mathématiques. Mais la distinction entre ces deux types de plans n'est pas stricte ; il existe des plans mixtes où certains monuments sont figurés en trois dimensions. Le plan de la ville d'Imola en Émilie par Léonard de Vinci, qui date de 1502, est célèbre. Comme nous le verrons, le premier plan géométral mixte de Paris est dû à Jacques Gomboust, ingénieur du roi, en 1652. Naturellement, la précision d'un plan dépend de son auteur. La qualité topographique est liée à l'entrée en scène des architectes et des ingénieurs puis à celle des véritables cartographes ayant une solide formation scientifique, opérant un triangulation sérieuse, avec de nombreuses stations d'observation, des mesures précises d'angles et de distances et effectuant les calculs trigonométriques correspondants.

Chaque type de plan présente des problèmes particuliers. Naturellement, l'orientation n'a pas la même importance dans un plan géométral, que l'on peut orienter comme l'on veut en le faisant tourner, que dans une vue cavalière où le point de vue est fixé par le dessinateur. Dans les vues cavalières, les rues parallèles au plan de vision ne se voient pas. On doit donc augmenter artificiellement leur largeur ce qui entraîne une diminution correspondante des îlots de maisons. Celles-ci sont d'ailleurs souvent identiques les unes aux autres car il est impossible de rendre compte des détails spécifiques de chacune d'entre elles. Seuls les édifices remarquables sont représentés individuellement. Dans les plans géométraux, il n'est pas question d'une distinction entre les maisons. On peut cependant adopter des conventions qui permettent de faire la différence entre le bâti et les jardins ou les cours. Par exemple, on peut griser les bâtiments, laisser en blanc les espaces libres et noircir les monuments. Il est évident que l'échelle compte pour beaucoup dans ce qu'il est possible de représenter ou non. Mais cette échelle dépend également du format de la feuille de papier selon les capacités de l'imprimeur et la maniabilité du plan. C'est pour ces raisons que certains plans sont établis sur plusieurs feuilles distinctes, reliées ou non en un atlas, et comportant souvent un schéma montrant comment passer d'une feuille à l'autre selon la direction de déplacement choisie. L'orientation et l'échelle sont données. Les plans comportent souvent une dédicace à un personnage

influent et un titre. Ils peuvent être agrémentés de vignettes, de commentaires, de listes des rues et des monuments et de légendes. Les noms du dessinateur et du graveur sont, en général, indiqués.

Toutes les villes ont fait l'objet de plans. Nous allons maintenant nous attacher plus spécifiquement à Paris car il est possible de s'appuyer sur un ouvrage de synthèse (voir Biblio : Pinon-Le Boudec). La première remarque est que l'apparition de plans de la capitale est bien tardive par rapport à ceux des villes italiennes (comme le plan de Venise qui se trouve dans le *Peregrinatio in Terram Sanctam* (1486) de Bernhard von Breydenbach, doyen de la cathédrale Saint-Martin de Mayence) ou à ceux des villes de la vallée du Rhin. Cela s'explique par son étendue importante dès la fin du XVe siècle. Les levés nouveaux sont donc rares. Mais la production se rattrape par la suite puisque l'on compte près de quatre cents plans entre le XVIe et le XVIIIe siècle. Nous ne parlerons pas ici des plans imaginaires de Lutèce, ni de ceux qui prétendent représenter la ville aux époques mérovingienne, carolingienne et au-delà.

La datation d'un plan est toujours délicate car, comme nous le verrons, il peut s'écouler de nombreuses années entre le relevé et la publication. En ce qui concerne Paris, les historiens pensent qu'une équipe de topographes, sous l'impulsion de François Ier, se mit au travail à partir de 1523 et qu'elle aurait continué son travail jusqu'en 1550, avec une pose vers 1535. Ils produisirent un plan original, dit *plan premier*, qui a été perdu mais est connu par ses copies. Il est postérieur à la fondation du collège de la Merci (rue des Sept-Voies, maintenant rue Valette, dans le Ve arrondissement) en 1523 et antérieur à 1530 à cause de la présence des portes de l'ancienne enceinte de Philippe Auguste détruites cette annéelà. Dans son état de 1535, il aurait été reproduit à la même échelle (environ 1/700e) et à la gouache, d'où son nom de *Grande Gouache*, vers 1540. Comme l'indique sa légende, toutes les maisons n'ont pas été représentées

> *Mais il y a plus de maisons sur la dîte ville dans ce portrait à cause que la mesure dessus dite* [l'échelle] *est trop petite, par quoi nous n'avons pu faire le tout des maisons lesquelles eussent été trop petites et incongrues.*

Ce plan fut détruit lors de l'incendie de l'Hôtel de ville en 1871, mais un relevé photographique en avait été effectué par Adolphe Berry, auteur d'une *Histoire générale de Paris*. Il aurait servi de base à nombre de ses successeurs. Vient ensuite le plan de l'humaniste allemand Sebastian

Münster, dont le portrait figurait sur les anciens billets allemands de 100 Deutsche Mark, gravé en 1548-1549, puis celui, en 1551, dit de Balthasar Arnoullet (ca. 1517 - 1556), du nom de son éditeur lyonnais, sans doute tous les deux des copies sommaires de la Grande Gouache.

Il n'est naturellement pas possible de mentionner tous les plans de Paris qui ont été réalisés au cours des siècles et l'énumération risquerait de devenir fastidieuse. Nous ne citerons que ceux qui, pour une raison ou pour une autre, présentent une particularité intéressante. On trouvera la plupart de ces plans sur internet.

Vers 1550, parut le plan de Saint-Victor, du nom de l'abbaye où il était détenu. C'est la plus ancienne version connue du plan premier. Il est gravé sur cuivre ce qui lui donne plus de finesse. La plus belle copie du plan premier est celle de Olivier Truschet, le graveur, et Germain Hoyau (1530 - 1583), le dessinateur, dit *plan de Bâle*, ville où il est conservé. Il date des environs de 1550. C'est une vue cavalière gravée sur bois. Comme il est entre trois et quatre fois plus grand que les autres, il comporte plus de détails.

Il faut attendre les plans de l'ingénieur militaire Marcel Gabriel Benedit de Vassalieu, dit Nicolay, (ca. 1564 - après 1614) et de François Quesnel (Édimbourg, 1543/1544 - Paris, 1619), un portraitiste, décorateur, peintre de retables et dessinateur de cartons de tapisseries, tous deux parus en 1609, pour voir un changement. La Seine n'est plus représentée verticalement, mais traverse le plan en diagonale et, surtout, la topographie y est beaucoup plus exacte. Chez Vassalieu, les nouvelles fortifications en terre et leurs bastions, construits à la fin du XVIe siècle entre la porte Saint-Denis et la Seine pour préserver l'enceinte de Charles V des tirs d'artillerie, sont représentés. Mais le rendu des édifices est meilleur dans le plan de Quesnel, la hauteur des monuments y étant moins exagérée. Il y a une volonté manifeste de glorifier la capitale comme résidence unique d'Henri IV, dont la statue équestre figure en haut et à gauche.

Le superbe plan de Mathieu Merian (Bâle, 15 août 1593 - Bad-Schwalbach, 25 mai 1650), un graveur suisse issu d'une famille d'orfèvres, date de 1615. C'est l'un des derniers en perspective cavalière. L'angle de vue est faible et il se rapproche d'une vue oblique à 45°. Ainsi, un effet de perspective est obtenu sans que les lignes fuyantes se rejoignent ni que les dimensions diminuent vers le fond de la vue. Un angle de vue plus petit est utilisé pour le paysage éloigné, ce qui accroît encore l'impression de distance. L'orientation est donnée par une boussole pointant

vers le nord. Le levé est précis, le graphisme remarquable, le réalisme très accentué. Le Pont-Neuf, premier pont de Paris à ne pas être couvert, terminé en juillet 1606, la place Dauphine, entreprise en 1607, et la place Royale (maintenant place des Vosges), inaugurée en 1612 à l'occasion des fiançailles de Louis XIII et d'Anne d'Autriche, y figurent. Merian fut sans doute le premier véritable spécialiste de la cartographie urbaine. Son plan inspirera de nombreuses copies jusqu'au milieu du XVIIe siècle.

Le premier plan géométral mixte est celui de Jacques Gomboust, ingénieur chargé ≪ des plans des villes et maisons royales ≫ par privilège du Roy du 31 décembre 1649 et dont la vie ne semble pas être connue. Il date de 1652. Les rues y apparaissent en vraie largeur et les maisons sont figurées par des masses projetées sur le sol et parsemées de points, mais les monuments sont toujours en perspective cavalière. Son travail inspirera les cartographes pendant un demi-siècle, avant que le plan géométral intégral ne s'impose définitivement.

Le plan de Paris et de ses environs d'Albert Jouvin de Rochefort (ca. 1640 - ca. 1710), trésorier de France, est le premier à être orienté avec le nord en haut et à placer horizontalement le cours central de la Seine. Il date de 1672-1674. Le Cours-la-Reine et les Champs-Élysées sont présents, mais le plan déborde de la ville et englobe Montmartre et Charonne avec le tracé des chemins et le découpage des champs. Il comporte un quadrillage rectangulaire. Il connut quatre rééditions en partie actualisées et servira de base à des plans ultérieurs.

Les enceintes médiévales étaient devenues obsolètes et étouffaient une capitale dont la population s'accroissait. Il fallait étendre et transformer la ville. En 1673, Louis XIV demande le levé d'un nouveau plan : ce sera le premier ≪ plan projet ≫. Pierre Bullet (Paris, 1639 - Paris, 1716), qui sera l'architecte de la Porte Saint-Martin (1674) et de l'église Saint-Thomas d'Aquin, en est le topographe, tandis que son maître, l'architecte François Blondel (Ribemont, 15 juin 1618 - Paris, 21 janvier 1686), est chargé de l'étude des projets d'aménagement. Il faudra trois ans pour le réaliser. Bullet procède à une nouvelle triangulation à l'aide d'un *pantomètre* de son invention. Le projet prévoit des boulevards plantés d'arbres de l'Arsenal à la Porte Saint-Denis (ce seront nos Grands Boulevards) et qui rejoignent les Tuileries. Par contre, sur la rive gauche, le projet de boulevard ne sera pas réalisé. C'est un plan géométral à l'exception des Tuileries, du Louvre, de la place des Vosges et du palais du Luxembourg. Le premier plan entièrement géométral

sera réalisé en 1692 par le géographe et graveur Nicolas de Fer (1646 - Paris, 15 octobre 1720).

Nous arrivons maintenant aux grands plans du XVIIIe siècle. Le premier d'entre eux est le plan mixte de Jean de La Caille (1664 - 1720), « imprimeur de la police » [sic], exécuté en 1714 sur ordre du lieutenant de police, Marc-René de Voyer de Paulmy, premier marquis d'Argenson (Venise, 4 novembre 1652 - Paris, 8 mai 1721) qui vient de diviser Paris en quartiers afin de mieux les contrôler. Nous avons déjà rencontré Guillaume Delisle. Nous lui devons, en 1716, un plan de Paris dont l'exactitude topographique est le but primordial. La triangulation primaire est basée sur l'Observatoire, les tours de Notre-Dame, le palais du Luxembourg et la Bastille. Pour les quartiers, il utilise le plan de La Caille. Il est strictement orienté au nord selon le méridien.

Jean Delagrive (Sedan, 1689 - 1757) est un prêtre lazariste. Il professe d'abord la philosophie au collège de sa congrégation à Cracovie. De retour à Paris, il se voue exclusivement à la gravure topographique et aux techniques d'arpentage et de triangulation. En 1728, il élabore le premier plan géométrique parcellaire de Paris, alliant l'exactitude du rendu à la précision des détails. Il donne leur nom aux Champs-Élysées. Les églises sont figurées en plan coupé détaillé. Cette idée sera reprise par Giovanni Battista Nolli (Côme, 9 avril 1701 - Rome, 1er juillet 1756) dans son magnifique plan de Rome gravé en 1748. Ce type de plan, dit à la (Delagrive)-Nolli, fut utilisé pour la cartographie romaine jusque dans les années 1970. Le plan de Delagrive eut de nombreuses rééditions. En 1733, cet abbé participe à la mesure de la perpendiculaire à la méridienne de l'Observatoire. Ses plans de Paris et ses environs et de Versailles lui valent d'être nommé géographe ordinaire de la Ville de Paris en mars 1735 par Turgot. Il propose d'effectuer un levé détaillé de Paris. Le travail commence en 1746 dans différents quartiers. Un plan précis de la Cité, au 1/1300e, paraît en 1754. Les minutes sont presque complètement achevées quand il décède. Son élève, A.F. Hugnin, publiera le plan d'autres quartiers.

Le plus célèbre plan ancien de Paris est sans doute celui dit de Turgot (il ne s'agit pas du ministre, mais de son père). Michel-Étienne Turgot (Paris, 9 juin 1690 - Paris, 1er février 1751), marquis de Sousmont, appartient à la magistrature du parlement de Paris depuis 1711, lorsque, le 14 juillet 1729, Louis XV le nomme prévôt des marchands de Paris. Il devient alors le représentant du roi et, à ce titre, il est le chef de la municipalité. Turgot va à l'encontre des plans géoméraux, destinés aux

érudits et, en 1734, il fait appel à l'artiste Louis Bretez (décédé à Paris en 1736), un dessinateur membre de l'Académie de peinture, pour réaliser une vue cavalière de grande dimension, au 1/400e, de la capitale. Il veut promouvoir sa magnificence. Afin de faciliter ses relevés sur le terrain, Brétez reçoit le droit d'entrer dans chaque maison, dans chaque jardin et dans chaque hôtel particulier. Son travail, minutieux et complet, dure deux ans. La gravure, effectuée par Antoine Coquart et Claude Lucas (1685 - 1765) se termine en 1739. C'est la plus somptueuse vue de Paris jamais réalisée. Elle comporte vingt planches. Toutes les maisons sont représentées. L'ombrage permet de rendre compte du style des facades et de la hauteur des édifices. Paris devient alors le modèle universel des capitales.

Les plans qui suivent sont plus classiques et géométraux. La seconde moitié du XVIIIe siècle voit une énorme production se développer car il faut montrer les changements intervenus dans la ville ainsi que son extension. En 1751, Edme Verniquet (Châtillon-sur-Seine, 10 octobre 1727 - Paris, 24 novembre 1804) prend la succession de son père, arpenteur du Roi. Il commence par construire de nombreux châteaux en Bourgogne. Puis il vient à Paris, sans doute appelé par Buffon, un autre bourguignon, pour l'aider dans l'aménagement du Jardin du Roi (notre Jardin des plantes). Le ministre Anne Robert Jacques Turgot, baron de l'Aulne (Paris, 10 mai 1727 - Paris, 18 mars 1781), le plus jeune fils du précédent, désirait voir lever un plan « avec toute la précision géométrique possible ». Verniquet commence à travailler, à ses frais, sur le projet en 1775. Dix ans plus tard, il en reçoit officiellement la commande. Le plan, au 1/144e, doit être établi à partir de soixante-sept stations. Le travail, qui nécessite entre cinquante et soixante ingénieurs, dure dix ans. Le plan est gravé entre 1793 et 1799 sur soixante-douze feuilles. C'est le premier plan véritablement exact de Paris et il servira de modèle à la plupart des plans du XIXe siècle. À cause des transformations effectuées sous la Restauration et l'ouverture de nouvelles voies, il sera repris et mis à jour entre 1827 et 1839 par Théodore Jacoubet, Mangot et Bailly. Ce sera le dernier plan produit par un architecte. Jacoubet fournira plusieurs éditions réduites de son plan. Celle de 1854 est particulièrement intéressante car elle montre l'état d'avancement des travaux entrepris par le baron Georges Eugène Haussmann (Paris, 27 mars 1809 - Paris, 11 janvier 1891) dans la capitale, qui n'avaient jamais été officiellement cartographiés. On y voit la rue de Rivoli, le boulevard de Strasbourg entre la Gare de l'Est et les Grands Boulevards et la rue des

Écoles. En vingt ans, soixante-dix voies nouvelles seront ainsi percées. Assez curieusement, il faudra attendre l'Exposition universelle de 1889 pour que soit dressé un atlas complet du nouveau Paris sous le contrôle de Jean-Charles Adolphe Alphand (Grenoble, 26 octobre 1817 - Paris, 6 décembre 1891), un ingénieur des Ponts et chaussées qui avait participé aux travaux de la capitale aux côtés d'Haussmann avant de lui succéder après le renvoi de ce dernier.

Revenons quelque peu en arrière. Par la loi du 15 septembre 1807, Napoléon avait commandé la réalisation d'un cadastre parcellaire du territoire français. Mais Paris *intra-muros* faisait exception. Philibert Vasserot (1773 - 1840), puis son fils Charles (Paris, 1804 - Paris, 1867), et Bellanger, assistés d'une armée de géométres et d'architectes, se lancent dans l'aventure en 1829. Ils lèvent un plan coupé au niveau du rez-de-chaussée (on n'a pas encore compris leur choix), de type Delagrive-Nolli, au 1/200e. Constitué à partir des plans cadastraux de chaque propriété dessinés entre 1809 et 1836, et monté sur le fond de plan de Verniquet, leur atlas donne les plans de 930 îlots et comprend 155 feuilles. Ce plan retardera en fait la publication d'un plan parcellaire normal, qui ne sera réalisé qu'à la fin du Second Empire par le Service du plan de Paris institué par Haussmann en 1856. Ce plan parcellaire a été détruit lors de l'incendie de l'Hôtel de Ville en 1871. On essaya bien de le reconstituer dès l'année suivante, mais le travail fut stoppé en 1896.

Terminons en signalant la carte d'État-Major de Paris au 1/50.000e qui date de 1906.

La production des cartes

Jettons maintenant un rapide coup d'œil sur les divers procédés de fabrication des cartes géographiques. Les premières cartes sont manuscrites, faute de moyen de production rapide et économique, et elles le resteront jusqu'à la fin du Moyen Âge. Chacune d'elles est une réalisation unique. Elles sont souvent des interprétations ou des copies plus ou moins fidèles. Celles que nous possédons sont dessinées à la plume et peintes au pinceau ou gravées sur pierre, argile, métal, papyrus, tissu, parchemin puis papier. Au XIVe siècle, la confection de papier de chiffon commence en Europe et le papier de coton, apporté de Chine par les Arabes et les Italiens, remplace le papyrus. Aucune règle précise ne régit le dessin, les signes conventionnels n'existent pas, les agglomérations sont

représentées soit en projection horizontale, soit en perspective cavalière, soit en mélangeant les deux, le relief est figuré tel qu'il apparaît et les montagnes sont souvent assez fantaisistes.

On abandonne peu à peu les cartes manuscrites. Les premières cartes estampées sont obtenues à partir d'une gravure sur bois (xylographie). Cette technique était connue en Chine dès les premiers siècles de notre ère. Cependant, elle ne se manifeste en Occident que vers 1400 pour l'impression des cartes à jouer. Cette technique se développe surtout en Allemagne, en Italie, en Hollande, puis en France. Elle consiste à prendre une plaque de bois très dur, ayant des fibres serrées, tel que du buis ou un arbre fruitier, et à y creuser les parties qui ne doivent pas recevoir d'encre. C'est ce genre de technique qui est toujours utilisée pour les timbres en caoutchouc de nos bureaux. Le graveur doit être très habile pour réserver, par exemple, les cours d'eau et les lettres. Il n'est donc pas possible d'exécuter une carte détaillée par ce procédé. De plus, il ne permet ni retouches, ni ajouts. La facture est assez lourde, mais les cartes sont suffisamment simples et peu chargées de sorte que leur clarté n'en souffre pas. Les graveurs cherchent rapidement à imaginer d'autres procédés.

Au milieu du XVe siècle, la gravure sur bois est remplacée par la gravure sur métal qui s'effectue en creux, autorise les modifications et permet de différencier la représentation d'un détail. On prend une plaque plane de métal, de l'étain au début puis du cuivre rouge, et on la polie. On y reporte le dessin puis, avec un outil tranchant, le burin, on y creuse des sillons dont la profondeur est en relation avec leur largeur. Puis on enduit la plaque, la matrice, avec de l'encre d'imprimerie dont on essuie l'excédent avec des tampons de mousseline. On ne garde de l'encre que dans les sillons. Il faut ensuite transférer le dessin sur papier. Pour cela, on mouille la feuille de papier de manière que, lorsqu'elle est pressée sur la plaque de cuivre, elle s'incruste dans les sillons pour en prendre l'encre. L'impression en couleurs est difficile car soit l'encrage est long s'il faut mettre toutes les couleurs sur la matrice pour effectuer le tirage en une seule fois, soit la superposition est délicate si l'on repasse la même matrice pour chaque couleur. On attribue à Maso Finiguerra (Santa Lucia d'Ognissanti, 1426 - Florence, 1464), un orfèvre de Florence, la découverte fortuite de cette sorte de gravure, dite en « taille-douce », en 1452. Mais c'est Albrecht Dürer qui, aux alentours de 1500, popularise le procédé. Très souvent, les tirages monochromes sont ensuite enluminés au pinceau avec des couleurs à l'eau. Cependant, à cause des habitudes

acquises, la xylographie continuera d'être employée pendant tout le XVIe siècle et même au début du XVIIe. Ce n'est qu'au XIXe siècle que seule subsistera la gravure sur cuivre ou sur acier (qui permet plus de finesse).

Une autre technique est celle de l'« eau-forte ». On recouvre le métal d'un vernis protecteur, résistant à l'acide. Le graveur reporte son dessin à la pointe sèche sur le vernis, laissant ainsi apparaître le cuivre. Puis on applique de l'acide sur la plaque qui se creuse là où le cuivre a été dégagé. Une fois le vernis enlevé, la plaque présente un dessin en creux. Ce genre de dessin à la pointe requiert une technicité bien moins grande que celle nécessitée par la taille douce, mais le résultat est de moindre qualité. L'eau-forte fut d'abord employée pour la décoration des armures. Sa première utilisation pour l'estampe remonte sans doute à Urs Graf (Soleure, ca. 1485 - Bâle, ca. 1527) en 1513. Elle fut souvent utilisée par les peintres graveurs comme Rembrandt (Leyde, 15 juillet 1606 - Amsterdam, 4 octobre 1669). Mais les corrections sont toujours difficiles. Pour effacer, il faut supprimer les creux en dégageant d'abord, avec un outil tranchant ou un abrasif, une large cuvette, puis en battant l'envers de la plaque pour la faire disparaître.

Quel que soit le mode de gravure, il faut bien en comprendre les difficultés et les limitations. Les gravures les plus fines ne peuvent être espacées de moins de 0.3 mm. Sur une carte au 80.000e, cela représente 24 m réels. Comment alors, par exemple, représenter une route moins large ? Un double trait obligerait à déplacer les maisons, les éléments du relief ou les cours d'eau qui la bordent. L'exactitude parfaite n'est pas possible. Il faut décider d'une convention et ce sera la nature qui prendra le pas sur les réalisations humaines. Le dessin sera donc toujours un compromis entre la réalité et les contraintes techniques.

Cartographie et peinture vont souvent de pair. Les premières cartes gravées sont autant des documents utilitaires que des estampes décoratives. Elles nécessitent généralement la collaboration de trois graveurs : un pour la carte elle-même, un pour les inscriptions et un pour l'ornementation. Le cartouche, d'origine italienne, gagne les Pays-Bas, où se trouvent les plus importants producteurs cartographiques, successeurs d'Ortelius et de Mercator, puis toute l'Europe. Le titre de la carte, le nom de son commanditaire, les noms des cartographes sont entourés de rubans, de guirlandes de fleurs et de fruits. Des allégories, des cornes d'abondance, des masques, des amours joufflus, des animaux et autres décorations sont placés tout autour du cadre. Les éditeurs font souvent appel aux meilleurs artistes. Des cartographes comme Cristoforo Sorte

(Vérone, 1506 ou 1510 - après 1594) sont des artistes et, réciproquement, Léonard de Vinci (Vinci, 15 avril 1452 - Amboise, 2 mai 1519) dessine également des cartes.

L'invention de l'imprimerie apporte un changement majeur dans la production et la diffusion des cartes. Les premières cartes imprimées paraissent en Europe vers 1470. Puis la presse à cylindre remplace la presse à vis. Les cartes deviennent plus faciles à corriger, à mettre à jour et sont produites plus rapidement. Leur dissémination s'intensifie. Longtemps cependant, même pour les cartes dressées par des ingénieurs commandités par l'État, la production reste l'apanage d'imprimeries privées, surtout préoccupées par le côté commercial de l'entreprise. Les graveurs sont rares parce que mal payés, longs à former, les matrices de cuivre gravées au burin ne résistent pas à un tirage supérieur à dix mille et celles produites à la pointe sèche ne peuvent dépasser deux mille. Les cartes restent donc chères et, dans l'armée, seuls les officiers supérieurs en possèdent. La qualité des cartes produites est très variable. Les gravures profondes résistent mieux à de nombreux tirages, mais la facture en est alors assez lourde. Certains éditeurs se contentent de recopier une ancienne carte en changeant seulement la date. Naturellement, de nouvelles erreurs s'ajoutent à celles qui existent déjà. Certains graveurs manquent de soin. Devant cette situation, on envisage, en 1762, de soumettre la production des cartes à un contrôle préalable exercé par l'Académie des sciences pour les productions nouvelles et par l'Académie des inscriptions et belles lettres pour les œuvres de géographie ancienne.

Le plus grand changement dans la production des cartes intervient grâce à l'invention de la lithographie par Aloys Senefelder en 1799. Le dessin s'effectue sur une pierre avec un crayon gras. Puis on enduit la pierre d'acide qui la ronge aux endroits où il n'y a pas d'encre et le dessin apparaît en relief. Il suffit d'encrer la pierre pour imprimer le dessin. Mais Senefelder s'aperçoit qu'il suffit en fait de créer deux types de surfaces sur la pierre : l'une qui retient l'encre et l'autre pas. Avec de l'encre durcie, il fait immédiatement un dessin sur une pierre. Il la mouille complètement puis passe dessus de l'encre liquide. L'encre se met uniquement sur les traits du dessin et pas aux endroits où la pierre est humide. Il n'y a plus qu'à poser une feuille de papier dessus et à presser. La lithograhie sur zinc est due à Léon Monrocq, un imprimeur cartographe parisien. Mais il est toujours nécessaire de dessiner à l'envers, comme dans un miroir. Malgré cet inconvénient, la lithographie fait cependant peu à peu son chemin.

En 1810, Friedrich König (Eisleben, 17 avril 1774 - Oberzell, 17 janvier 1833), un imprimeur allemand, eut l'idée d'utiliser un rouleau pour étaler le papier sur la surface plane de la pierre et, en 1846, Richard Marsh Hoe (New York, 12 septembre 1812 - Florence, 7 juin 1886) inventa une presse dans laquelle la surface où se trouvait ce que l'on voulait imprimer avait également la forme d'un tube. Plus tard on mit en face un rouleau en caoutchouc pour presser le papier contre l'autre tube. Ce type de presse était courant. Un jour, dans une imprimerie du New Jersey, la presse se mit en marche mais le papier resta coincé. Les deux rouleaux, celui avec le dessin encré et celui de caoutchouc, tournèrent l'un contre l'autre sans papier. L'ennui fut vite réparé et le papier recommença à passer. Voulant vérifier que tout avait bien fonctionné, l'imprimeur examina l'épreuve et vit, avec surprise, que les deux côtés de la feuille étaient imprimés, l'un à l'envers et l'autre à l'endroit. L'encre s'était tout simplement mise sur le rouleau de caoutchouc et avait donné une image inversée sur le verso du papier parce qu'elle était inversée sur le rouleau encreur. On pouvait naturellement partir d'un rouleau encreur où le dessin était à l'endroit et obtenir, de la même manière, une impression dans le même sens. Le procédé d'impression appelé offset était inventé.

Par des moyens physico-chimiques qui permettent de créer différentes plages séparées pour recevoir l'encre, on peut imprimer en plusieurs couleurs. L'un des principaux mérites de la gravure est d'avoir montré que l'on pouvait transférer une image par une opération photo-mécanique, ouvrant ainsi la voie à l'impression photographique. La plaque est enduite d'une substance sensible à la lumière sur laquelle on dessine. On l'expose à la lumière. Les parties protégées restent solubles et le métal est mis à nu. On fait agir de l'acide qui creuse les sillons de la plaque comme le faisait le graveur. Les difficultés ont disparu avec les photocomposeuses, toutes dérivées de la « Nomafot » française, créée à la fin de la Seconde Guerre mondiale. La production cartographique est maintenant entièrement automatisée.

En guise d'épilogue

Parlons un peu des notions de cartographie et de géographie que nous avons apprises à l'école. Qui ne se souvient des belles cartes murales qui ornaient nos salles de classe ? On les doit, pour la plupart, à Paul Vidal de La Blache (Pézenas, le 22 janvier 1845 - Tamaris-sur-Mer, 5 avril

1918). Il entre en 1863 à l'École normale supérieure à l'âge de 18 ans et, en 1866, il est reçu à l'agrégation d'histoire. Il est nommé à l'École française d'Athènes et en profite pour voyager en Italie, en Palestine et en Égypte où il assiste, en 1869, à l'inauguration du canal de Suez. En 1872, il présente à la Sorbonne une thèse d'histoire antique. Après la défaite de 1870, un mouvement s'était élevé en France pour développer la géographie dans l'ensemble du système scolaire. Il est nommé maître de conférences, puis sous-directeur de l'École normale supérieure et enfin professeur à la Sorbonne. Il fonde, avec le géographe Lucien Gallois (Metz, 21 février 1857 - Paris, 21 mars 1941), les *Annales de géographie* en 1891. On lui doit de nombreuses publications qui, toutes, eurent un grand retentissement et une énorme influence sur les générations futures de géographes français.

Et que dire de nos livres d'enseignement ? Henri Pierre Maxime Bouasse (Paris, 16 novembre 1866 - Toulouse, 15 novembre 1953) est un scientifique français qui fut professeur à l'université de Toulouse de 1892 à 1937. Ses principaux travaux portent sur les phénomènes irréversibles liés au frottement, la viscosité, l'hystérésis et les déformations permanentes. Mais il est principalement connu pour avoir rédigé un vaste traité de physique en 45 volumes, auquel il donna le nom de *Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien*. Ses préfaces et ses nombreuses remarques à caractère polémique, notamment contre la mauvaise organisation de l'enseignement scientifique en France ou contre la relativité à laquelle il était farouchement opposé, lui fermèrent de nombreuses portes et lui valurent des inimitiés tenaces. (voir Biblio : voir R. Locqueneux).

L'un des volumes de sa collection porte sur la *Géographie mathématique*. En guise d'épilogue, voici certains passages du chapitre intitulé *Cartes géographiques*

> *Suivant son humeur le lecteur trouvera ce chapitre et le suivant trop courts ou trop longs. Qu'il évite un jugement hâtif : je n'étudie guère que les projections dont parle l'introduction de l'atlas Schrader-Prudent-Anthoine, qui est classique. Si mon lecteur a le sens de l'ironie, il s'offrira du bon sang en comparant mon texte à celui de ces messieurs. Il comprendra le ridicule de ces « renseignements »* à l'usage du grand public *! Tout le monde n'est pas forcé d'être cartographe ; il est même fort heureux que tout le monde ne le soit pas. Mais, pour Dieu ! si vous parlez* cartographie*, que ce soit*

*d'une manière qui ne soit pas stupide. Je ne conteste pas la science de ces messieurs ; je constate seulement le grotesque de la servir en entier dans les quatre colonnes de l'introduction d'un atlas. Par de telles sottises on détraque l'esprit français en lui apprenant à se contenter de mots et d'*à peu près*...*

C'est toujours la même rengaine. En Chimie les élèves ne savent pas un mot des notations ; il est naturel qu'en Géographie ils ignorent tout des systèmes de représentation.

Aussi bien je ne réclame pas que, sous prétexte de Science*, on leur débite ni surtout qu'on leur dicte les âneries qui ornent les atlas les plus réputés ; je suis plus modeste parce que je connais la question...*

Je demande que les professeurs de Géographie sachent bien les choses élémentaires, soient capables des calculs simples et, au lieu d'apprendre par cœur que « la superficie de l'Europe est de 10.252.169 kilomètres carrés, sans l'Islande », soient capables d'évaluer grosso modo *cette aire d'après la carte.*

Hélas ! je leur demande d'être intelligents !

Les institutions françaises

Les armées ont toujours eu besoin de cartes et, de façon naturelle, les campagnes et les guerres ont toujours été un puissant moteur de leur production. On s'adresse d'abord à des peintres, comme Andrieu de Moncheaux qui effectue le relevé des remparts d'Amiens en 1518. Ce ne sont alors que des dessins panoramiques, sans échelle précise, et dans un seul but artistique. Pendant le XVIe siècle, les rois de France recrutent des ingénieurs italiens pour les fortifications car ceux-ci sont capables de dresser des plans exacts en respectant la même échelle. Henri IV et Sully aiment consulter les cartes des ingénieurs militaires. Dans ses *Oeconomies royales*, Sully dit du roi que *Les longs discours n'étoient pas à son goût... Il aimoit avec passion les cartes chrorographiques et tout ce qui étoit des sciences mathématiques.* Le Service des fortifications est créé en 1604. Chaque province frontalière possède son ingénieur du roi, assisté d'un « conducteur de desseins ». Ils laisseront une production cartographique importante, comme celles de François Martelleur pour la Picardie ou de Jean de Beins (Paris, 1577 - Saint-Egrève, 1651) pour le Dauphiné, un ingénieur qui eut la responsabilité des opérations du siège de la ville de Suse. De douze pendant le règne d'Henri IV, ces ingénieurs passeront à cinquante sous Louis XIII. Leurs travaux sont rassemblés dans des atlas manuscrits. En 1634, à la demande de Richelieu, Christophe Tassin, commissaire ordinaire des guerres, fait paraître son atlas *Les cartes générales de toutes les provinces de France.* En 1649, Mazarin reçoit une trentaine de ces atlas. Louis XIV renforce leur rôle. Sébastien de Pontault, sieur de Beaulieu, (ca. 1612 - 1674) est l'un des créateurs de la topographie militaire. Soldat lui-même – il avait perdu le bras droit lors du siège de Philippsbourg en 1644 – il grave les événements presque immédiatement après leur déroulement. Après sa mort, sa nièce Reine de Beaulieu, fait paraître, en 1694, *Les glorieuses conquêtes de Louis le Grand*, recueil de cartes et de plans des sièges, batailles et expéditions

depuis 1643. Les luxueux volumes des *Campagnes de Louis XIV*, parus après 1678, qui mélangent cartes, textes et illustrations, sont dûs au peintre Adam Frans Van der Meulen (Bruxelles, 11 janvier 1632 - Paris, 15 octobre 1690). Entré au service du Roi-Soleil en 1664, il le suit partout et immortalise le déroulement de ses campagnes, pour sa plus grande gloire naturellement.

Les premiers documents concernant l'ensemble du territoire français ne datent que de la fin du XVIe siècle. Ce n'est que très progressivement, au cours du XVIIe siècle, que les Ingénieurs du Roi sont chargés de l'établissement des cartes dont les militaires ont besoin pour leurs opérations. C'est grâce à Vauban (Saint-Léger-de-Foucherets, Morvan, 4 mai 1633 - Paris, 30 mars 1707) que ces travaux acquièrent une précision jusque-là inconnue, mais ils ne s'étendent guère au-delà des places fortes et leur disparité est, de toute façon, un obstacle majeur à leur réunion en une carte unique.

Le Dépôt de la guerre

La fin du XVIIe siècle voit la création, en marge du Génie, d'un service spécial chargé du levé et de l'établissement des cartes et des plans. Ces militaires restent attachés à leurs corps respectifs et prennent le titre d'*Ingénieurs des camps et des armées*. François Michel Le Tellier, marquis de Louvois (Paris, 18 janvier 1641 - Versailles, 16 juillet 1691, après avoir secondé son père, le secrétaire d'État Michel Le Tellier (Paris, 19 avril 1603 - Paris, 30 octobre 1685) devenu chancelier, institue le *Dépôt de la guerre* en 1688. Son but n'est alors que de réunir les archives dans son hôtel particulier afin de les classer.

Selon le désir de Louis XIV, Louvois fait réaliser les célèbres plans-reliefs au 1/600e. Le premier de ceux-ci, représentant la ville de Narbonne, avait été exécuté en 1665 par l'ingénieur François Andréossy (Paris, 10 juin 1633 - Castelnaudary, 3 juin 1688), sous les ordres de Riquet. En 1667, Louvois demande à Vauban de faire exécuter le plan en relief de la place d'Ath, maintenant en Belgique, puis ceux des citadelles de Dunkerque et de Lille. Louis XIV réunit ainsi dans la galerie du Louvre cinquante plans-reliefs des différentes places fortes de son royaume. Après la mort de Louvois, le tout fut relégué dans les greniers du château de Versailles où, tout en continuant de s'enrichir de nouveaux documents, il resta pratiquement oublié jusqu'à la fin du règne de Louis

XIV. Le développement se poursuivit sous la Régence et tout au long du règne de Louis XV. En 1777, la collection comptait cent vingt plans. Elle fut transférée dans les combles de l'Hôtel des Invalides. Cependant, elle s'accrut encore pendant le Consulat et l'Empire. Le premier plan-relief à avoir été construit à l'aide de courbes de niveau équidistantes fut celui de l'île de Vido qui se situe dans la rade de Corfou, en 1813-1814. Au total, entre 1668 et 1870, deux cent soixante plans-reliefs représentant cent cinquante sites fortifiés implantés aux frontières du royaume et dans les anciennes possessions françaises ont été construits.

Mais revenons à la chronologie. Le Dépôt de la guerre s'organise peu à peu à l'époque des traités d'Utrecht (1713) et de Rastatt (1714). Les archives manuscrites sont transférées aux Invalides, c'est le *Dépôt des archives de Paris* qui rassemble toute la correspondance concernant les guerres. Le *Dépôt des cartes et plans* et le *Dépôt des fortifications* restent à Versailles. La topographie militaire se met en place dans les premières années du règne de Louis XV. En 1716, un petit groupe autonome est constitué sous la direction de l'ingénieur en chef Roussel (16 ? ? - 1733) qui est chargé de définir les attributions du personnel et d'édicter et d'unifier les règles de travail. En 1718, le colonel d'infanterie Alexandre-Robert d'Hermand (décédé en 1739) lui succède et les officiers sous ses ordres prennent le titre d'*Ingénieurs-Géographes pour les camps et les armées*. Le brigadier d'infanterie de Lillier est nommé à leur tête en 1730 et une tenue spéciale leur est attribuée deux ans après. En 1756, le duc de Choiseul (1719 - 1785) regroupe les Dépôts de la guerre de Paris et Versailles ainsi que les Ingénieurs-Géographes sous le commandement d'un directeur du Dépôt de la guerre. Le poste est confié au lieutenant-général de Cremilles. Le lieutenant-général de Vault (1717 - 1790) lui succède en 1761 et l'ingénieur en chef Jean-Baptiste Berthier (Tonnerre, 6 janvier 1721 - Paris, 21 mai 1804), père du maréchal d'Empire Louis-Alexandre, obtient la réunion à Versailles de l'ensemble du Dépôt et prend la tête du corps des Ingénieurs-Géographes. Il fait lever des cartes des côtes de la Martinique (1763-1767) et de la Bretagne (1771-1785), l'hydrographie ayant pris un grand retard sur la cartographie.

Les premières cartes à caractère véritablement topographique apparaissent au début du XVIIIe siècle avec, en particulier, la *Carte des monts Pyrénées* (1719-1730), la *Carte des frontières du Piémont et de la Savoie*, terminée en 1719, et la *Carte de la frontière d'Allemagne et des Pays-Bas* de 1736. La principale innovation est l'établissement d'un canevas de triangulation vers 1745. Des cartes dites « géométriques » en

résultent comme la *Carte des Flandres*, établie sous la direction de Cassini de Thury, et les *Cartes géométriques des frontières du Sud-Est*, exécutées sous le contrôle de Pierre Joseph de Bourcet (Usseaux, 1er mars 1700 - Meylan, 14 octobre 1780). C'est sous son influence que l'on passe de la représentation du relief en perspective cavalière à sa représentation en projection verticale. Il utilise cette projection verticale pour les reliefs moyens, mais représente toujours les reliefs abrupts par un profil aigu et dentelé. À partir de 1758, l'ingénieur géographe Jean Villaret (Montpellier, 1703 - 1784 ?), utilise des hachures pour rendre les demi-teintes de l'estompage de l'original. En 1772, il est nommé chef des ingénieurs géographes militaires, en remplacement de Jean-Baptiste Berthier. Vient ensuite la célèbre carte de Cassini déjà mentionnée et les divers travaux qui l'accompagnent. La fin du règne de Louis XV est marquée par la très belle *Carte des chasses du Roi*. D'abord destinée à cartographier les environs de Rambouillet et de Versailles, elle englobera finalement Vincennes et Paris. Considérée comme un chef-d'œuvre, c'est sur elle que s'appuiera la commission de 1802 pour fixer la plupart des règles de gravure qui seront en vigueur pour toutes les cartes produites durant la première moitié du XIXe siècle.

L'Assemblée constituante maintient le Dépôt de la guerre mais, soucieuse d'économie, elle rend, à la mort du général de Vault, un décret qui équivaut à sa suppression. Le corps des Ingénieurs-Géographes disparaît. Les guerres révolutionnaires rendent cependant indispensable leur résurrection. Les péripéties dues à cette période troublée de notre histoire sont trop nombreuses pour être comptées ici dans le détail. Les directeurs changent, la guillotine fait même son œuvre, les dénominations varient, les créations et les suppressions d'organismes s'enchaînent. Le 16 avril 1793, le général Étienne-Nicolas de Calon (Grandvilliers, 3 octobre 1726 - Paris, 4 juin 1807), un ancien Ingénieur-Géographe qui était député montagnard de l'Oise, est choisi par la Convention pour diriger le Dépôt et réorganiser le corps des Ingénieurs-Géographes. Il effectue la réunion avec le Dépôt de la marine, créé une école d'ingénieurs, une autre d'historiographes, une *Division des savants* qui compte Delambre et Méchain parmi ses membres et dont la charge est de mesurer la Méridienne de France, et enfin il constitue des bureaux topographiques aux armées. Le plus actif est celui d'Italie dirigé par Léopold Berthier, autre fils de Jean-Baptiste et frère du maréchal. Calon se plaint du manque de collections. Il s'en ouvre au trop célèbre Fabre d'Églantine (Carcassonne, 29 juillet 1750 - Paris, 5 avril 1794) qui est membre du Co-

mité de sûreté générale. Celui-ci porte des accusations (c'était l'époque !) sur des particuliers qui s'enrichissent avec cette carte, exécutée aux frais du gouvernement, et demande qu'elle devienne accessible à tous. En septembre 1793, la carte de Cassini est transférée de l'Observatoire au Dépôt de la guerre.

Sous l'impulsion de l'abbé Henri Jean-Baptiste Grégoire (Vého, Trois-Évêchés, 4 décembre 1750 - Paris, 20 mai 1831), le *Bureau des longitudes* est créé par une loi de la Convention nationale du 7 messidor an III (25 juin 1795). Il s'agit de *faire fleurir notre marine* et de reprendre *la maîtrise des mers aux Anglais* grâce à l'amélioration de la détermination des longitudes en mer et le perfectionnement des tables astronomiques. Ses compétences sont larges : astronomie, géodésie, physique du Globe, hydrographie, météorologie et magnétisme terrestre. Il doit en outre diffuser la connaissance en assurant un cours public d'astronomie. C'est Arago qui assurera cet enseignement de 1813 à 1846. Chargé de la publication annuelle de la *Connaissance des temps* et de l'*Annuaire du Bureau des longitudes*, le Bureau a sous sa responsabilité l'Observatoire de Paris (regardé avec une certaine méfiance car de fondation royale), l'Observatoire de l'École militaire et tous les instruments d'astronomie qui appartiennent à la Nation. Les dix membres fondateurs sont Lagrange, Laplace, Lalande, Delambre, Méchain, Cassini, Bougainville, Borda, Buache et Caroché.

Bonaparte, nommé général d'artillerie à l'armée de l'Ouest le 13 juin 1795 (25 prairial an III), est peu pressé de se rendre à son poste. Il se fait mettre en congé. Barras intervient et, le 18 août (1er fructidor an III), il est affecté au Bureau topographique du ministère de la guerre par Louis-Gustave Doulcet, comte de Pontécoulant (Caen, 17 novembre 1764 - Paris, 3 avril 1853), alors président de la Convention. C'est là que se décident les plans de campagne et les mouvements des armées. Au nom du Comité de salut public, Bonaparte rédige successivement pour les généraux François Étienne Kellermann (Metz, 4 août 1770 - Paris, 2 juin 1835) et Barthélémy Louis Joseph Schérer (Delle, 18 décembre 1747 - Chauny, 19 août 1804), qui ne les comprennent pas, des projets et des instructions pour l'armée d'Italie. Ces documents sont conservés aux archives militaires ; ils sont entièrement de la belle écriture de Junot et corrigés par Bonaparte qui les mettra lui-même en œuvre un an plus tard.

Pendant la campagne d'Italie, général en chef, Bonaparte se constitue d'ailleurs un bureau topographique personnel dont il confie la direction

à un jeune officier de talent qu'il a connu pendant le siège de Toulon (et que nous avons déjà rencontré), Louis-Albert-Guislain Bacler d'Albe, qui ne fait pas alors partie du Dépôt de la guerre. Ce dernier entreprend, pour son compte et par souscription, une carte générale du théâtre des opérations ; Bonaparte fait les premières avances de fonds. Bacler d'Albe est l'un des plus proches conseillers militaires de Napoléon, travaillant seul avec lui sous sa tente, de jour comme de nuit, et prenant avec lui les décisions stratégiques. L'un des meilleurs cartographes de son temps, il réalise la première carte homogène de l'Europe (au 1/100.000e), dite *Carte de l'Empereur* (1809-1812) ; le seul exemplaire existant sera en partie perdu pendant la retraite de Russie. Il est aussi un peintre renommé pour ses scènes de batailles et un bon graveur. Nous aurons l'occasion de reparler de lui, mais revenons à la chronologie. L'œuvre de Calon avait suscité beaucoup de jalousie, il fut attaqué de toutes parts et le Directoire laissa ses adversaires saper son travail. Cependant, après de nombreuses péripéties, ses principales réformes subsistèrent. Les topographes du Dépôt de la guerre reprirent toute leur importance à l'occasion de l'expédition d'Égypte. Le Consulat renforça encore leur position.

Jusqu'en 1802, aucune uniformité n'avait été respectée entre les différentes cartes, aucune signalisation conventionnelle n'avait été envisagée, les échelles étaient différentes car fixées d'après les anciennes unités de mesure qui variaient d'un lieu à l'autre. Une commission, présidée par le général Nicolas Antoine Sanson (Paris, 7 décembre 1756 - Passy, 29 octobre 1824), directeur du Dépôt de la guerre de 1802 à 1812, entreprend alors de remédier à cet état de fait. Le dessin du relief en demi-perspective est abandonné et remplacé par le procédé des courbes de niveau. Cette idée avait été présentée à l'Académie des sciences par Marcellin du Carla-Boniface en 1771. Elle fut reprise par le lieutenant Jean-Baptiste Marie Charles Meusnier de la Place (Tours, 19 juin 1754 - Pont de Cassel près de Mayence, 13 juin 1793) en 1777 puis, en 1782, par Jean-Louis Dupain-Triel (Paris, 1722 - 1805) qui publia la première carte de France en courbes de niveau en 1791. Enfin, le procédé est définitivement mis au point en 1801 par le chef de bataillon du Génie François-Nicolas-Benoît Haxo (Lunéville, 24 juin 1774 - Paris, 25 juin 1838). Des hachures sont utilisées pour représenter le relief par projection des lignes de plus grande pente, selon une proposition du capitaine du génie Pierre-Antoine Clerc (né à Nanterre en 1770), chef de brigade topographique au Dépôt de la guerre, datant de 1797. Il entreprend des

levés nivelés de Montmartre et de Gentilly et en construit les reliefs. En 1811, ses élèves de l'École du génie achèvent le levé et le relief de La Spezia et présentent la carte à Napoléon. Clerc se servait de la boussole, du niveau à lunette et de l'éclimètre pour déterminer directement les courbes de niveau. Bacler d'Albe améliore la technique avec des ombres. Des tableaux de signes conventionnels sont établis ; la plupart sont encore en usage actuellement. Les échelles métriques à adopter sont fixées. La reprographie est également codifiée, dimension des feuilles et techniques de gravure sur cuivre. Les grands principes étant posés, chaque membre de la commission reçoit mission d'étudier et de préciser les détails d'application de l'un des aspects considérés. Dès l'année suivante, Bacler d'Albe rend sa copie sur la gravure cartographique. Les autres contributions ne viendront que très longtemps après, entre 1820 et 1830. (voir Biblio : Chapuis, MacEachren).

Sanson entreprend de réorganiser le corps des Ingénieurs-Géographes mais son projet heurte les intéressés car il ne voulait plus les considérer comme des officiers. Le travail continue cependant. De 1805 à 1808, Sanson prend part aux campagnes et est remplacé par son adjoint. À son retour, il fait prendre un décret satisfaisant qui fixe l'organisation du *Corps impérial des ingénieurs géographes des camps et marches des armées*. Il édicte un règlement sur les travaux topographiques : les instruments autorisés sont décrits, les opérations de premier ordre doivent être faites avec le cercle répétiteur de Borda, la projection de Bonne est rendue obligatoire, la division décimale du cercle est imposée. Le 9 mai 1812, le général Sanson quitte son poste pour prendre la direction du service topographique de la Grande Armée. Il n'en reviendra pas. Le 5 décembre, il est fait prisonnier par les Russes qui s'emparent de presque la totalité du matériel topographique et des cartes. Les documents étaient uniques car manuscrits. Ceux qui échappent à l'ennemi sont brûlés par ordre de l'Empereur. Le 2 mars 1814, Bacler d'Albe est nommé à la tête du Dépôt de la guerre. À deux reprises, il sauve du pillage des armées alliées les cuivres de la fameuse carte de Cassini, seule carte de France de l'époque. Après les Cent jours, partisan trop ardent de Napoléon, il est remplacé, comme beaucoup d'autres.

Entre 1816 et 1831, le travail des Ingénieurs-Géographes est axé sur les actions militaires conduites sous la Restauration : carte d'Espagne pour l'expédition punitive du duc d'Angoulème, insurrection grecque, conquête de l'Algérie. Puis, le général Jean-Jacques Germain Pelet-Clozeau (Toulouse, 15 juillet 1777 - Paris, 20 décembre 1858), directeur

du Dépôt de la guerre, fait procéder à l'établissement de la nouvelle carte de France au 1/80.000e dite *Carte d'État-Major*, entre 1830 et 1850. À l'avènement du Second Empire, le Dépôt change seulement de dénomination. Les guerres de Crimée et d'Italie, les campagnes du Liban et du Mexique accaparent les topographes. La jonction géodésique entre la France et l'Angleterre est réalisée en 1861 par le colonel Hippolyte Louis Levret (Paris, 9 décembre 1801 - 1883), directeur de la Section de géodésie et de topographie au Dépôt de la guerre.

Les cercles répétiteurs de Borda commençaient à être fatigués. Un jeune ingénieur géodésien, François Perrier, alors capitaine, expérimente en Algérie un nouveau cercle qu'il a fait construire par Brunner et qui est basé sur la réitération. Un jour, alors qu'il se trouve sur les montagnes qui bordent la mer près d'Oran, il aperçoit les sommets de la Sierra Nevada. Ainsi il a l'idée de relier les réseaux algérien et espagnol, entreprise qui dure de 1870 à 1888. Perrier et le général espagnol Carlos Ibáñez de Ibero, marquis de Mulhacén, (Barcelone, 14 avril 1825 - Nice, 29 janvier 1891) en sont chargés. Le rattachement est basé sur quatre sommets : le pic de Mulhacen, sommet le plus élevé de la Sierra Nevada (3.481 m), le pic de Tetica de Bacares (2.080 m), dans la province d'Almeria, point culminant de la Sierra de los Filabres, et, en Algérie, le Filhaoussen (1.136 m), l'un des derniers sommets à l'ouest du parallèle d'Alger, entre Ghazaouet (ex Nemours) et Tlemcen, et enfin M'Sabiha (591 m), un point au voisinage d'Oran sur le plateau de la chaîne de Murdjadjo. La distance entre le Filhaoussen et le pic de Mulhacen est de 270 km environ. Pour être visibles de nuit, ces quatre sommets sont équipés de signaux lumineux, rythmés à intervalles réguliers et produits par des lampes électriques munies de réflecteurs. Commencée le 9 septembre 1879, la jonction est définitivement établie le 2 octobre. Comme le réseau espagnol est déjà relié à celui de la France, lui-même relié au réseau anglais, on obtient ainsi un arc de 28° s'étendant des îles Shetland à Laghouat. C'est pour Perrier le début d'une belle carrière.

Le Dépôt de la guerre est supprimé et rattaché à l'État-Major général des armées par décret du 8 juin 1871. Perrier, devenu membre du Bureau des longitudes et membre de l'Institut, mène une vive campagne pour l'organisation d'un service géographique au sein de l'armée. Par décret du 25 octobre 1881, le Dépôt est reconstitué sous la forme d'une Section de géographie composée de quatre bureaux : un de géodésie, un de topographie, gravure et ateliers, un d'archives et de bibliothèques, un de comptabilité et vente des cartes. Devenu lieutenant-colonel, Perrier

dirige le bureau de géodésie. Le 10 janvier 1882, il remplace le colonel Bugnot comme sous-directeur de la Section géographique de l'État-Major. Un nouvel essor commence. Le Dépôt reçoit une nouvelle composition qui ne satisfait pas Perrier qui veut regrouper dans son service tous les organismes cartographiques d'État et en exclure les autres. Il obtient partiellement satisfaction en 1885. Par décrets du 24 mai 1887, le Dépôt de la guerre est supprimé et remplacé par le *Service géographique de l'armée*. Perrier, général depuis janvier 1887, en assume la direction. Il meurt le 19 février 1888.

Le Service géographique de l'armée

Après un court intérim du colonel Foucher, le colonel Victor Bernard Derrécagaix (Bayonne, 14 septembre 1833 - Anglet, 11 avril 1915) succède à Perrier. Promu général, il est remplacé par le général Gaston Ovide de la Noë (Limoux, 17 mai 1836 - Paris, 1er septembre 1902) qui préconise l'établissement d'une carte de France au 1/50.000e. Ce sera son successeur, le général Antonin Léon Bassot (Renève, 6 avril 1841 - Paris, 17 janvier 1917), membre de l'Institut, qui sera chargé de cette tâche. À son congrès de Stuttgart en 1898, l'Association géodésique internationale émet le vœu que la détermination de la longueur d'un arc de méridien sur 5° de latitude soit reprise en Amérique du Sud. La France revendique l'honneur d'effectuer cette opération qui, sur proposition du célèbre mathématicien Henri Poincaré (président du Bureau des longitudes en 1899, puis de nouveau en 1909 et en 1910), est confiée au Service géographique de l'armée. Dans le rapport de la commission à l'Académie des sciences, en 1900, il écrit

> *Mais enfin, il y a un corps qui est fait pour ce travail ; nous ne sommes pas sûrs de trouver aussi bien, nous sommes sûrs de ne pas trouver mieux. Et ce que nous n'aurions pas ailleurs, c'est la cohésion, l'habitude de travailler ensemble, d'appliquer les mêmes méthodes, la discipline, enfin, qui permettra de faire vite et sans tâtonnements.*

Rappelons, qu'à cette époque, Poincaré était engagé, à la suite du développement de la télégraphie électrique qui permettait la synchronisation des horloges du monde, dans la définition d'un temps local et d'un temps universel qui permettraient de rendre compte de l'expérience de Michelson-Morley sur l'invariance de la vitesse de la lumière, de tran-

cher la question de l'existence de l'hypothétique éther et d'interpréter la transformation de Lorentz qui allait mettre Albert Einstein sur la voie de la formulation de la théorie de la relativité restreinte. On sait, qu'en 1905, Poincaré publia un article préfigurant les idées d'Einstein, mais qu'il n'osa pas franchir le pas en affirmant leur réalité objective et ne les considéra que comme un artifice mathématique. La détermination de la longueur d'un arc de méridien dépassait donc largement la seule géodésie.

Le président de l'Équateur promet son entier soutien à la France pour son expédition. Le lieutenant-colonel Joseph Émile Robert Bourgeois (Sainte-Marie-aux-Mines, 21 février 1857 - Paris, 10 novembre 1945) dirige l'expédition qui a lieu entre 1901 et 1906 (voir Biblio : M. Schiavon). Les relevés se poursuivent en Afrique du Nord. En 1903, le général Henri Marie Auguste Berthaut (Épinal, 1er janvier 1848 - Paris, 18 décembre 1937) succède à Bassot. La carte de France et les travaux en Algérie et en Tunisie se poursuivent. En 1908, il créé un bureau topographique à Casablanca. Les premiers levés sont effectués au Maroc occidental et aux confins algéro-marocains. Avant de prendre sa retraite en 1911, Berthaut fait adopter une réforme du Service géographique de l'armée qui devient indépendant de l'État-Major. Bourgeois, nommé général de brigade en 1912, lui succède. De 1908 à 1929, il occupe la chaire d'astronomie et de géodésie de l'École polytechnique, à la suite d'Henri Poincaré. Il est élu à l'Académie des sciences, le 18 juin 1917, dans la Section de géographie et navigation et en sera président en 1932. Il préside le Comité national de géographie de 1920 à 1945 et est le premier vice-président de l'Union géographique internationale de 1925 à 1928, puis de 1931 à 1934 et son président de 1928 à 1931. Le Service géographique comprend trois sections : celle de géodésie dirigée par le lieutenant-colonel Lallemand, celle de topographie dirigée par le colonel Vidal et celle de cartographie sous la responsabilité du lieutenant-colonel Thiébault.

La Grande Guerre voit une modification et un accroissement des missions du Service géographique de l'armée. Le 2 août 1914, la mobilisation est décrétée, tous les travaux sur le terrain sont suspendus et chaque membre du personnel doit rejoindre son unité. Seuls quelques officiers qui remplissent des fonctions spéciales restent à leur poste. Les vides sont comblés par le rappel d'officiers supérieurs en retraite, quelques officiers complémentaires et, plus tard, par des officiers hydrographes. On doit répondre à toutes les demandes de cartes qui sont nombreuses. Après la victoire de la Marne (12 septembre 1914), les positions des

armées se figent sur une ligne de plus de 800 km de la mer du Nord aux Vosges. L'artillerie française n'est pas en mesure de faire feu efficacement sur ses objectifs qui ne sont pas repérables visuellement. Il est nécessaire de déterminer certains points avec la plus grande précision comme cela se passait lors des sièges. Bourgeois créé alors les *Groupes de canevas de tir* dont Cholesky fait partie (voir le chapitre suivant). Ces groupes vont s'étendre sur l'ensemble du front et effectuer une cartographie de précision du terrain sur lequel on se bat et des positions ennemies. Cette carte prend le nom de *Plan directeur*, car destiné à diriger le tir des batteries. La tâche n'est pas facile. Il faut essayer de rendre le relief le mieux possible. L'une des possibilités est de survoler les lignes en avion et de prendre des photographies. Mais les avions de l'époque volent bas et les clichés sont pris très obliquement, ce qui oblige à les ramener à l'horizontale. Une autre solution est le repérage au son des batteries ennemies grâce à un système d'analyse acoustique inventé par les physiciens français Pierre Weiss (Mulhouse, 25 mars 1865 - Lyon, 24 octobre 1940) et Aimé Auguste Cotton (Bourg-en-Bresse, 9 octobre 1869 - Sèvres, 16 avril 1951).

Sur le site //pagesperso-orange.fr/jmpicquart/Reperageauson.htm, on trouve les informations suivantes. Alors qu'il était au fort de Bois Bourru à Verdun en septembre 1914, Ferdinand Daussy, un soldat du 45e régiment d'instruction des télétransmissions, avait été frappé par le réflexe de ses camarades qui indiquaient du bras le moment où partaient les tirs de la batterie allemande. En février 1915, il fut envoyé à l'arsenal de Verdun où il réalisa, à partir d'un moteur de phonographe et d'un diapason entretenu électriquement, un appareil de repérage au son inscrivant sur un papier d'enregistrement le 1/100e de seconde. En juin 1915, pendant un brouillard intense qui gênait tous les autres modes habituels d'observation, il utilisa ce matériel pour détecter l'emplacement des canons allemands. Ces canons, bien dissimulés, causaient de graves dommages aux cantonnements français dans le village de Douaumont. À partir de trois postes d'observation installés respectivement à Thiaumont, Souville et à la batterie du Mardi-Gras, Daussy procédait à une triangulation et situait les pièces allemandes derrière les Jumelles d'Ornes. Le colonel Plassiart déclencha ensuite un tir des batteries françaises sur cet emplacement, arrêtant ainsi le feu de l'ennemi. Par la suite ce matériel fut placé sur trois observatoires, aux bois d'Herbebois, des Caurières et du Grand Chenas. Peu de temps après, Daussy quittait le front pour une affectation à l'inspection des forges de Paris, compte tenu de son

expérience dans la sidérurgie, laissant sur place un ingénieur (le canonnier Gabriel Moinet ?) qu'il avait formé à l'utilisation de son invention. Il termina la guerre avec le grade de lieutenant. En 1935, vraisemblablement sidérurgiste, il fut élu président de l'Association des officiers de réserve de la région de Thionville et de l'Aéro-Club de Moselle. Les travaux des Groupes de canevas de tir se poursuivront jusqu'à la fin de la guerre. Un petit opuscule, vraisemblablement publié à compte d'auteur par Daussy en 1934, rappelle cette invention. Signalons qu'en 1943-1945, avant son arrestation et sa condamnation à huit ans de camp, Alexandre Soljénitsyne fut responsable d'une batterie de repérage par le son.

Après 1918, les activités directement liées au conflit cessent ou se transforment. Le colonel Léon Henri André Bellot (Ivry-sur-Seine, 17 septembre 1873 - 1942), directeur du Service géographique de l'armée de 1919 à 1935, reconstitue avec les officiers disponibles les sections de géodésie, de topographie et de cartographie. Il est nommé général en 1925. Il réorganise tout, institue des cours pour les nouvelles recrues, met en œuvre des procédés nouveaux, établit une documentation géodésique et cartographique qui répond aux besoins de tous. La section de géodésie est confiée au colonel Antoine François Jacques Justin Georges Perrier (Montpellier, 28 octobre 1872 - 16 février 1946), fils du général François Perrier et qui avait pris part à la campagne de mesure du méridien en Amérique du Sud. Bellot veut lancer des cartes de France au 1/20.000e et au 1/50.000e, mais des difficultés financières viennent contrecarrer son projet. Le travail n'avance que lentement. De plus, la photographie aérienne a fait d'importants progrès et l'on sait maintenant restituer correctement les cartes d'après les photographies. Les pays d'Outre-Mer ne sont pas oubliés et les cartes en sont régulièrement mise à jour et publiées. En 1935, le général Jean-Baptiste Dominique Pierre Viviez (Pau, 6 août 1877 - ?) prend la direction du Service géographique.

L'Institut géographique national

Un décret du 27 juin 1940 supprime, à la date du 1er juillet 1940, le Service géographique de l'armée, qui faisait partie du ministère de la guerre et le remplace par l'*Institut géographique national* qui dépend du ministère des Travaux publics. Son rôle est d'exécuter dans le domaine géodésique, topographique et cartographique tous les travaux d'intérêt général. Le corps des officiers géographes et celui des sous-officiers géographes sont dissous. Son premier directeur est le général

Louis Aristide Alexandre Hurault (Attray, 8 août 1886 - Vincennes, 1973). Il tente, en vain, de récupérer le matériel saisi par les Allemands. Le fonds de cartes anciennes est divisé en deux ; une partie reste à l'Institut et l'autre va rejoindre les archives militaires de Vincennes. En 1941, est créée l'*École nationale des sciences géographiques* qui forme les futurs ingénieurs cartographes. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Institut a tout le matériel nécessaire et tout le personnel compétent à la fabrication de faux papiers. Un ensemble complet de cartes de France et d'Afrique du Nord est envoyé clandestinement à Londres, les personnels participent activement à la résistance armée à partir du printemps 1943. Plusieurs agents sont fusillés par les Allemands ou sont tués au combat. Après la guerre, l'Institut reçoit la mission de couvrir l'ensemble du territoire national et celui de toutes les possession françaises. Le 1er janvier 1967, il est placé sous la tutelle du ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer. En 1971, l'Institut et le Centre national d'études spatiales sont regroupés pour former le *Groupe de recherches de géodésie spatiale*. L'aventure spatiale commence.

Un topographe français : André Cholesky

La biographie de Cholesky présentée ici tient compte des archives militaires qui ont été ouvertes au public en octobre 1995, des archives personnelles qui ont été déposées à l'École polytechnique (le Fonds A. Cholesky) et de souvenirs familiaux qui m'ont été communiqués directement.

Enfance et études

André Louis Cholesky naquît le 15 octobre 1875, à une heure du soir comme l'indique son acte de naissance, à Montguyon. C'est une petite commune de l'arrondissement de Jonzac (Charente Maritime) à 35 km environ au nord-est de Bordeaux, qui compte actuellement de l'ordre de 1.700 habitants et où l'on traite les argiles blanches et l'on fabrique des parquets et des lambris. Il était le fils d'André Cholesky, maître d'hôtel, né le 9 octobre 1842 à Montguyon (lui-même fils de Louis Cholesky, 28 ans, cordonnier, et d'Anne Moreau, âgée de 32 ans) et de Marie Garnier, 27 ans. Dans son livret matricule d'officier, il est fait mention du surnom de René ; c'est d'ailleurs le prénom qui est inscrit sur sa tombe. André avait de nombreux frères et sœurs. La famille, des gentilshommes dont le blason était Cholewa, avait émigré en France à l'époque napoléonienne. C'étaient de bons patriotes dont le nom, à l'origine, s'écrivait Cholewski. C'est sans doute pour cela que, sur certains documents en sa possession, Cholesky avait lui-même orthographié son nom Choleski.

On semble ne rien savoir de son enfance qu'il passa vraisemblablement à Montguyon. Il fut élève au lycée de Saint-Jean-d'Angély (son nom apparaît sur la plaque commémorative des anciens élèves et professeurs morts pour la France à l'intérieur du lycée Audouin-Dubreuil).

Il obtint la première partie de son baccalauréat à Bordeaux le 14 novembre 1892 et la seconde partie, avec la mention assez bien, le 24 juillet 1893, toujours à Bordeaux. Le 15 octobre 1895, il entre à l'École polytechnique, 87ème sur 223 et signe un engagement de 3 ans dans l'armée à la mairie du 5ème arrondissement de Paris. Sa fiche signalétique le décrit comme ayant les cheveux et les sourcils châtain clairs, le front haut, le nez long, les yeux châtains, la bouche moyenne, le menton rond et le visage ovale. Il mesure 1 m 75. Le commandant de l'École est alors le général Louis Joseph Nicolas André (Nuits, Côte d'Or, 29 mars 1838 - Dijon, 18 mars 1913) et le directeur des études s'appelle Ernest Jules Pierre Mercadier (Montauban, 4 janvier 1838 - Paris, 27 juillet 1911). Ses professeurs sont Camille Marie Ennemond Jordan (Lyon, 5 janvier 1838 - Paris, 22 Janvier 1921) et Marie Georges Humbert (Paris, 7 janvier 1859 - Paris, 22 janvier 1921) pour l'analyse, Jacques Rose Ferdinand Émile Sarrau (Perpignan, 24 juin 1837 - Paris, 10 mai 1904) et Henri Charles Victor Jacob Léauté (Bazile, 26 avril 1847 - Paris, 5 novembre 1916) pour la mécanique, Paul Émile Haag (Paris, 10 janvier 1843 - 26 avril 1911) pour la géométrie, Octave Pierre Jean Callandreau (Angoulême, 18 septembre 1852 - Paris, 13 février 1904) pour l'astronomie et la géodésie, Marie Alfred Cornu (Orléans, 6 mars 1841 - La Chausonnerie, près de Romorantin, 12 avril 1902) et Henri Antoine Becquerel (Paris, 15 décembre 1852 - Le Croisic, 25 août 1908) pour la physique, Henri Gal (né à Marseille, le 15 juin 1839) pour la chimie, Fernand de Dartein (Strasbourg, 9 février 1838 - Paris, 19 février 1912) pour l'architecture, Auguste George Gabriel Duruy (Paris, 10 mars 1853 - 1918), fils de Victor du même nom, pour l'histoire et la littérature, et enfin Jean-Baptiste Claude Eugène Guillaume (Montbard, Côte d'Or, 4 juillet 1822 - Rome, 1905) pour le dessin. Le major d'entrée et de sortie est un certain Jules Louis Crussard (Neufchâteau, Vosges, 10 juin 1876 - 2 janvier 1959). En 1896, Cholesky passe de deuxième en première division, 56ème sur 222, et sort de l'École en 1897, 38ème sur 222. Il est admis dans l'Artillerie, 4ème sur 92. Sa conduite et sa tenue sont qualifiées de très bonnes et son instruction militaire d'assez bonne.

Il est sous-lieutenant, élève à l'École d'application de l'artillerie et du génie de Fontainebleau à partir du 1er octobre 1897. Il en sort en 1899, 5ème sur 86. Il y suit des cours d'artillerie, de fortification permanente, de construction, d'art militaire, de mécanique, de sciences appliquées, d'hippologie et d'hippiatrique (la médecine des chevaux), d'histoire militaire et de géographie de la France et de ses colonies. Les cours d'ar-

tillerie militaire comprennent 55 journées d'application avec 5 dessins et 9 mémoires et portent sur la balistique, l'application aux questions de tir et l'étude des tables de tir, les levés de bâtiments et d'usines, des projets de machines et des coupes géologiques de terrain. Il y a également un cours de topographie qui avait été donné, avant l'arrivée de Cholesky, par le lieutenant-colonel Charles-Moyse Goulier (Richelieu, 31 janvier 1818 - Paris, 14 mars 1891), l'inventeur, entre autres, de l'alidade nivellatrice, de l'alidade holométrique et de la règle à éclimètre, instruments qui seront décrits par Cholesky dans ses livres. D'après les manuels en usage dans cette école à cette époque, les cours de topographie étaient très complets. On y trouve ainsi un cours d'instruction sur le dessin topographique par le capitaine de Génie H. Bosson, professeur adjoint, un cours anonyme sur les opérations de cheminement et un second par le capitaine du Génie R. Denis, professeur adjoint, un autre cours anonyme sur le lever de reconnaissance, un cours de reconnaissance de terrain par le capitaine du Génie Albert Marie René Romieux (né à Neuilly-sur-Seine, le 19 décembre 1848), professeur, des conférences de minéralogie par le capitaine du Génie C. Letellier, professeur, des exercices topographiques des capitaines du Génie Auguste-Virgile-Jean Lehagre (né à Montfort, le 27 avril 1834), Romieux et H. Bosson, un cours sur les instruments, les procédés topographiques et les conventions du dessin topographique par L. Jardinet, L. Protard et Bonnes, capitaines du Génie et professeurs, un cours de géologie par R. Tétart, professeur adjoint, un cours sur le lever de fortification par Romieux, un cours sur les levés d'ensemble par Romieux et Bosson. Les exercices topographiques exigent de la part des élèves de sérieuses qualités de dessinateur et, à ce propos, Goulier signale qu'ils sont *d'une inhabileté extrême*. Enfin, à partir de 1897, les moniteurs de gymnastique donnent des leçons facultatives de bicyclette ce qui sera utile à Cholesky pour aller d'une station à l'autre lors de ses séjours dans les Alpes comme en témoigne son journal (voir plus loin).

Le topographe

Le 1er octobre 1899, Cholesky est nommé lieutenant en second au 22ème régiment d'artillerie. Les premières opérations de triangulation de l'Algérie dataient de 1854. Elles avaient été interrompues par la guerre de Kabylie, reprises en 1859 et dès lors continuées sans interruption. Lorsque la Tunisie passa sous le protectorat français en 1881, la triangulation y fut prolongée. Du 17 janvier 1902 au 27 juin, Cholesky

effectue une mission en Tunisie, puis une autre du 21 novembre 1902 au 1er mai 1903. Du 31 décembre 1903 au 6 juin 1904, on le retrouve en Algérie. Le 24 juin 1905, il est affecté au Service géographique de l'État-Major de l'armée. Il s'y fait immédiatement remarquer par une vive intelligence, une grande facilité pour les travaux mathématiques, des idées originales et parfois même paradoxales, mais toujours empreintes d'une grande élévation de sentiments, et qu'il soutient avec beaucoup de chaleur. À cette époque, suite à la révision de la méridienne de Paris, une nouvelle triangulation cadastrale de la France venait d'être décidée ainsi que la mesure de la méridienne de Lyon. Ces missions avaient été confiées à la Section de géodésie ainsi que l'établissement de la carte de l'Algérie et le nivellement géométrique précis de ce pays. Le problème de la compensation des réseaux préoccupait bon nombre d'officiers du Service géographique désireux de trouver une méthode simple, rapide et précise. D'après la notice nécrologique rédigée par le commandant Benoît,

> *C'était l'époque où la révision de toute la triangulation française venait d'être décidée pour faire suite à la révision de la Méridienne de Paris et pour servir de base à une nouvelle triangulation cadastrale. Le problème de la compensation des réseaux préoccupait bon nombre d'officiers de la Section, désireux de contribuer à fixer dans le sens de la rapidité, de la commodité et de la précision maxima, des méthodes qui n'étaient pas encore entièrement arrêtées. Cholesky aborda ce problème en apportant dans ses solutions, comme dans tout ce qu'il faisait, une originalité marquée. Il imagina pour la résolution des équations de condition par la méthode des moindres carrés un procédé de calcul très ingénieux qui rendit aussitôt de grands services et qu'il y aurait certes avantage pour tous les géodésiens à publier un jour.*

Citons également un autre rapport

> *La partie de la Méridienne de Lyon comprise entre le parallèle de Paris et le parallèle moyen avait été reconnue en 1904 : au Nord et au Centre, par le capitaine Durand ; au Sud, par le commandant de Fonlongue. Les emplacements de tous les signaux avaient été parfaitement définis, et la hauteur à donner à chacun d'eux exactement déterminée à l'aide de l'échelle de reconnaissance.*

> *En 1905, ces deux géodésiens avaient fait les observations de la partie est du parallèle moyen et du rattachement de ce parallèle à la Méridienne de Lyon. Tous deux étant partis, à la fin de la même année, rejoindre la Mission géodésique française de l'Équateur, les observations de la Méridienne de Lyon furent confiées, en mai 1906, au capitaine Lamotte, secondé par le capitaine Benoît.*
>
> *Le programme de 1906 consistait à achever la liaison de la méridienne au Parallèle de Paris, et à poursuivre les observations en s'étendant de ce parallèle vers le Sud.*
>
> *En 1904, le capitaine Durand avait fait complètement les observations des stations de Vaudémont, Hautmont et Haudompré avec le poids 24 ; mais les signaux de Croix-Marguerite et de Champfleury n'avaient pas été construits.*
>
> *En 1906, il fallait donc construire deux derniers signaux, ainsi que Chailluz, La Serre, Mont-Poupet et Pierre ; observer en Moncel et Essey pour compléter le rattachement du Parallèle de Paris à la Méridienne de Lyon ; reprendre les observations en Hautmont et Haudompré ; et continuer au Sud par les stations de Croix-Marguerite, Champfleury, Chailluz et La Serre.*
>
> *Ce programme a été exécuté de point en point.*

Cholesky prend part à ces campagnes de mesures dans la vallée du Rhône, dans le Dauphiné, dans l'Isère et dans les Cévennes, à Montellier, près du mont Aigoual (juillet et septembre 1905) et à La Charpenne. Il est important de noter la présence du capitaine Benoît, sans doute celui-là même qui écrira la notice nécrologique de Cholesky et publiera sa méthode en 1924.

Le 26 septembre 1905, il passe lieutenant en premier. Il épouse, le vendredi 10 mai 1907 à la mairie de La Roche-Chalais (Dordogne), par autorisation ministérielle du 22 avril 1907, sa cousine germaine Anne Henriette Brunet, née le 27 juin 1882. Elle est la fille de François Brunet, âgé de 52 ans, propriétaire agriculteur, et de Anne Garnier, tante d'André. À cette époque, il habite au 33 bis, rue Rosa Bonheur, Paris 15ème. Ils auront deux fils, dont un posthume, et deux filles : René (né en 1908), Françoise (née en 1909), Hélène (née de 1911) et André (né en 1919), tous décédés. Actuellement plus aucun descendant ne porte son nom.

Les mesures de la méridienne de Lyon continuent. Les observations commencent à Pierre-en-Besse (10 juin au 7 juillet 1907). Elles sont d'abord retardées par la pluie et la brume mais sont ensuite favorisées par un temps exceptionnellement beau. Il en est de même au mont Poupet (8 au 25 juillet 1907) à cause de brumes solaires. Des signaux sont construits à La Mouillère (en deux jours), à La Chalentinne et à Nivigne (trois semaines, jusqu'à fin septembre, par suite d'une longue période de brumes très intenses). D'autres signaux sont élevés au Crêt de la Neige, au Grand Colombier et au Granier en moins d'un mois. En 1907, la portion de la chaîne allant du parallèle moyen du côté La Serre-Chailluz au Le Montellier-Grand Colombier est terminée. On retrouve certains de ces noms dans les carnets de Cholesky.

Cholesky effectue une mission en Crète, alors occupée par les troupes internationales, du 7 novembre 1907 au 25 juin 1908. À la suite d'une proposition du colonel Lubanski, commandant supérieur des troupes françaises en Crète et lui-même ancien géodésien, et d'une reconnaissance rapide effectuée en mars-avril 1906 par le lieutenant-colonel Robert Joseph Émile Bourgeois (Sainte-Marie-aux-Mines, 21 février 1857 - Paris, 10 novembre 1945, qui deviendra général et sera élu à l'Académie des sciences, Section géographie et navigation, le 18 juin 1916) qui commande la Section de géodésie, il est décidé d'entreprendre la triangulation des secteurs français et britannique de l'île (départements de San Nicolo et de Candie) ainsi que le levé topographique du secteur français. Trois officiers, dont Cholesky et le commandant Lallemand, effectuent pendant trois mois les travaux préliminaires : mesure d'une base de 8 km de longueur dans la plaine de Kavousi et détermination d'une latitude et d'un azimut astronomiques au terme sud. Se femme, enceinte, le suit sur un âne. Puis Cholesky reste seul trois mois de plus pour exécuter la triangulation des secteurs français et anglais. Les reconnaissances de terrain et la construction des signaux se poursuivent en plein hiver. La Crète, large de 57 km au maximum et longue de 250, a un point culminant de plus de 2.400 mètres. À la fin mai, il est encore nécessaire, sur les hauteurs de Lassithi, de faire fondre la neige pour obtenir l'eau nécessaire au détachement. On conçoit donc la difficulté de la tâche qui se termine vers la mi-juin 1908. Malheureusement les circonstances politiques ne permirent pas de faire ensuite les relevés topographiques.

Le 25 mars 1909, Cholesky est nommé capitaine en second au 27ème régiment d'artillerie et maintenu au Service géographique. Le 28 août

1909, il est rayé des contrôles du Service géographique et rejoint, le 14 septembre par décision ministérielle, le 13ème régiment d'artillerie afin d'y effectuer son temps légal de deux ans comme commandant de la 13ème batterie qui venait d'être créée. C'est à cette époque qu'il rédige le manuscrit conservé dans ses archives sur sa méthode de résolution des systèmes d'équations linéaires, la fameuse *méthode de Cholesky*. Le 24 septembre 1911, il est affecté à l'État-Major particulier de l'artillerie et, le 13 octobre de la même année, au Service géographique de l'armée dirigé par le général Bourgeois qui avait comme adjoint le capitaine (Jean Raoul Marie, ou l'un de ses frères ?) Chicoyneau de Lavalette du Coetlosquet (Metz, 13 février 1869 - Réméréville, 24 août 1914). La direction du nivellement en Algérie et en Tunisie lui est confiée. Le chef de la Section de géodésie est le lieutenant-colonel Lallemand, lui-même brillant géodésien que nous avons déjà rencontré. Dans un rapport du SGA, il est écrit

> *Le nivellement de précision, commencé en Tunisie, se poursuivit en Algérie, à partir de 1889 ; il y fut dirigé de 1890 à 1896, par le capitaine Bourgeois, futur directeur du Service géographique. Interrompus faute de crédits en 1896, les travaux avaient repris en 1903 ; activement poussés depuis 1910 par le capitaine Cholesky, qui modifia notablement les méthodes pour gagner du temps, ils purent continuer régulièrement jusqu'en 1914.*

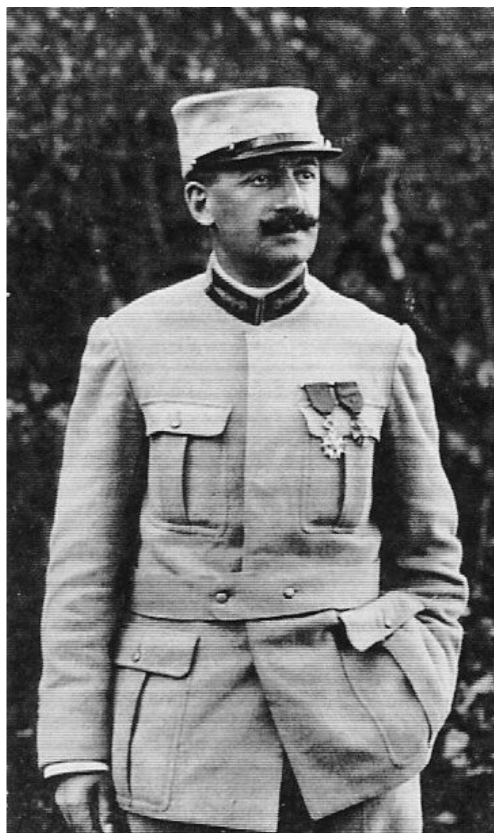
Du 27 octobre 1911 au 24 avril 1912, Cholesky effectue des travaux géodésiques en Algérie avec un séjour de 4 jours au Sahara (26-30 mars 1912) dans l'oasis du Rhir. Le 8 octobre 1912, il est de nouveau désigné pour prendre part à la campagne 1912-1913 des travaux de nivellement en Algérie et en Tunisie. Il doit se rendre à Marseille pour embarquer le 25 octobre 1912 à 13h à destination d'Alger. Il a droit à une indemnité de 10 F. par jour pour travaux géodésiques et à 5 F. pour indemnité de montagne. Il est autorisé à emmener son soldat d'ordonnance mais pas son cheval. Il devra rentrer à Paris a l'issue de sa mission. Il poursuit donc, avec son ardeur habituelle, les travaux de triangulation en vue de l'établissement de cartes et ceux de nivellement de précision en Algérie et en Tunisie entre octobre 1912 et le 17 avril 1913. En Algérie, ces travaux ont pour but la construction d'une ligne de chemin de fer entre Orléansville, Vialar et Trumelet afin de relier le plateau agricole du Sersou à la vallée du Cheliff. Des difficultés considérables sont rencontrées à cause du terrain accidenté et de la rigueur du climat du massif de l'Ouar-

senis. Un tronçon de la route entre Biskra et Touggourt est également nivelé. En Tunisie, le nivellement de précision des routes et des voies ferrées de la région de Tunis est mené à bien. Le réseau primordial tunisien est terminé sur le terrain pendant l'hiver 1913-1914. Les calculs sont immédiatement revus, remis en ordre et le réseau est arrêté et compensé. Au mois de mai 1912, Cholesky avait reçu l'ordre d'étudier un procédé de nivellement permettant de travailler plus vite qu'en Algérie et en Tunisie tout en conservant une précision suffisante afin que les résultats puissent être immédiatement utilisables dans l'étude des chemins de fer et aussi, éventuellement, dans le cadre d'ensemble des lignes à niveler ultérieurement au Maroc. La méthode et les conditions générales du travail sont d'abord étudiées au bureau puis essayées sur le terrain au polygone de Vincennes par quatre militaires mis à la disposition de Cholesky. Ceux-ci partent pour Casablanca au début de juillet 1912 et opèrent au Maroc jusqu'en janvier 1913. Le livret matricule d'officier de Cholesky fait état, vers cette époque, de blessures mais sans détails ni précision de date.

Le 25 mai 1913, Cholesky est placé hors cadre, à la disposition du ministre des Affaires étrangères, et est nommé chef du Service topographique de la Régence de Tunis. Il y reste jusqu'au 2 août 1914, date de la mobilisation, où il rejoint le 7ème groupe d'artillerie à Bizerte. Le 15 septembre, il y embarque pour rejoindre le dépôt du 16ème régiment d'artillerie basé à Issoire. Il débarque à Marseille le 17.

L'enseignant

À partir de décembre 1909 (et peut-être avant) jusqu'à, au moins, janvier 1914, Cholesky participe à l'enseignement par correspondance de l'*École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie* fondée en 1891 par Léon Eyrolles (Tulle, 14 décembre 1861 - Cachan , 1er décembre 1945), un ancien conducteur des Ponts et chaussées. Cette école comporte cent dix professeurs et sept mille élèves, internes, externes ou correspondants, dans tous les pays du monde. Cholesky doit corriger des devoirs envoyés par les élèves et surtout rédiger des cours. On possède plusieurs lettres du directeur adjoint les lui réclamant avec insistance. Il est chargé d'un cours de *Topographie générale* et d'un cours de *Calcul graphique des contenances*. En janvier 1914, il reçoit même une lettre lui demandant de préparer un cours de *Notions de cosmographie et d'astronomie de position*.



André-Louis Cholesky

On trouve, dans les papiers qu'il a laissés, des manuscrits correspondants à ces cours, ainsi que les exercices qu'il avait préparés pour les élèves.

La planchette, ou goniographe, est un instrument capital en topographie et il en est largement fait mention dans les écrits de Cholesky. C'est un appareil qui sert à reporter sur une feuille, le canevas, les angles qui ont été mesurés par un goniomètre. L'alidade est un instrument de visée employé pour pointer et tracer des directions. Il a été inventé par Archimède, au IIIe siècle. Il comporte une règle avec deux pinnules qui pivote sur un cercle gradué et qui est montée sur la planchette d'un goniographe. La règle comporte un biseau gradué le long duquel on trace le trait qui correspond à la direction de l'objet pointé. Dans l'alidade

holométrique, inventée en 1667 par les français Adrien Auzout et Jean Picard, cette visée s'effectue à l'aide d'une lunette comportant une règle à éclimètre. Elle est utilisée pour les levés à moyenne et grande échelle. Ces instruments nécessitent un ensemble de réglages délicats afin d'assurer une précision maximale aux mesures. Cholesky les a décrits largement dans ses divers cours.

Plusieurs ouvrages de Cholesky, correspondants à ses cours, ont été publiés. En premier lieu, son *Cours de topographie* qui eut au moins sept éditions, était encore publié vingt ans après sa mort et est maintenant presque introuvable (il y en a un exemplaire à la bibliothèque François Mitterand, mais il est interdit de le consulter tellement son état est mauvais). Cholesky publia un autre ouvrage, *Compléments de topographie. Levés d'études à la planchette*, dont la troisième édition, revue par Lafosse, directeur-adjoint du Service de la reconstitution foncière et du cadastre au ministère des régions libérées (*sic*!), date de 1923. Comme il est intéressant d'avoir l'opinion d'un homme de terrain sur l'utilisation des instruments à sa disposition ainsi que l'avis d'un enseignant sur la formation des futurs géomètres, voici donc son introduction

> *Caractère spécial des levés à la planchette et à la « Boussole-Éclimètre ».*
>
> *Le but de cette partie du cours de Topométrie est l'étude des levés de topographie détaillée, aux échelles variant de* 1/500 *à* 1/5000*, exécutés soit à l'aide de la planchette déclinée, soit à l'aide de la « Boussole-Éclimètre » ou tout autre instrument équivalent.*
>
> *Ces instruments sont simples, d'un maniement facile et toujours peu coûteux. Alors que l'usage d'instruments plus compliqués et par suite d'un prix plus élevé s'est beaucoup répandu dans la pratique des levés à grande échelle, il n'est pas sans intérêt de montrer aux futurs géomètres que l'on peut toujours à l'aide d'instruments relativement peu précis réaliser, par l'emploi d'une méthode rationnelle de travail, d'excellentes conditions d'exactitude.*
>
> *On remarquera qu'il serait inutile, et même souvent nuisible au point de vue de la durée des travaux, d'employer des instruments plus précis que ceux qui conviennent au genre de levé à exécuter.*

Il est superflu en effet de chercher à mesurer des quantités qu'il est impossible de représenter sur le dessin. On ne saurait prétendre que l'emploi d'un instrument plus précis permet de travailler à plus grande distance et par suite d'aller plus vite en évitant des pertes de temps et des déplacements, car dans un levé à grande échelle, l'opérateur qui veut faire un levé exact est obligé d'aller partout.

Par contre, le topographe doit être bien convaincu qu'il peut employer souvent des instruments très rudimentaires, à condition de ne pas leur demander plus qu'ils ne peuvent donner. L'intérêt particulier qui s'attache à l'emploi des instruments plus simples est que, généralement, la durée d'une opération quelconque est d'autant plus grande qu'on lui demande plus de précision.

Dans le manuscrit de ce livre qui se trouve aux archives de l'École polytechnique, deux feuilles supplémentaires présentent les idées de Cholesky sur le programme des études du cours qu'il a donné. Il se termine par

Recommandation très importante.

L'élève se tromperait beaucoup s'il croyait trouver dans les cours qu'il a entre les mains les solutions complètes des exercices qui lui sont proposés. Ces exercices ont pour but principal de le forcer à réfléchir, de l'empêcher d'apprendre ses cours trop strictement, en lui indiquant que dans un travail aussi complexe qu'un levé topographique, tout dépend de la valeur de l'opérateur qui doit par suite être habitué à raisonner toutes ses opérations. Aussi l'élève aura-t-il souvent avantage, lorsqu'il sera arrêté par un exercice à abandonner l'étude du cours et à chercher simplement si le bon sens ne lui indiquera pas la solution. Les exercices corrigés constitueront un complément indispensable du cours, et non pas une répétition ; aussi l'élève ne devra-t-il pas se décourager s'il rencontre des difficultés sérieuses dans les exercices qui lui sont proposés. Qu'il montre qu'il sait réfléchir, on ne lui en demandera pas davantage.

Il n'y a rien à ajouter !

Le fonds A. Cholesky des archives de l'École polytechnique possède également le manuscrit d'un *Cours de calcul graphique* de 83 pages 15.5×20 cm. Dominique Tournès, professeur à l'université de la Réunion, procède actuellement à son édition.

Puisque nous parlons des travaux scientifiques de Cholesky, mentionnons certains de ceux-ci reliés à notre propos. On possède un manuscrit de trois pages intitulé *Sur la détermination des fractions de secondes de temps*, un autre de huit pages avec le titre *Équation de l'ellipsoïde terrestre rapportée à Ox tangente au parallèle vers l'Est, Oy tangente au méridien vers le Nord, Oz verticale vers le zénith* et un manuscrit de seize pages *Étude du développement conique conforme de la carte de Roumanie.*

Le nom de Cholesky se retrouve dans certains ouvrages actuels de topographie. Sa méthode de résolution des systèmes d'équations linéaires y est citée en rapport avec la méthode des moindres carrés. Il est également souvent fait mention du *cheminement double de Cholesky.* Ce procédé de nivellement, que Cholesky met en œuvre en Afrique du Nord à partir de 1910, consiste à mener simultanément deux cheminements disjoints en plaçant la mire de nivellement successivement en deux points distincts situés en arrière puis en deux points situés à l'avant et ainsi de suite. On calcule ensuite séparément les deux cheminements et l'on compare les résultats obtenus. C'est de cette même année que date le manuscrit où il expose sa méthode de résolution des systèmes linéaires ; il en sera largement question plus loin.

La guerre

Le 24 septembre 1914, Cholesky est nommé commandant de la 9ème batterie du 23ème régiment d'artillerie. Le 27 septembre, il est désigné pour remplacer le commandant du 3ème groupe qui vient d'être évacué. Il y fait fonction de chef d'escadron jusqu'au 18 octobre. À la suite de l'arrivée du commandant Girard, il retourne au commandement de sa batterie.

Au début de la guerre, les cartes d'État-Major françaises au 1/80.000e utilisaient la projection de Bonne. L'artillerie, qui tirait jusque-là à vue, fut amenée à pointer des objectifs invisibles définis par leur position sur une carte. L'expression de *plan directeur* provient du fait qu'il était

utilisé pour diriger le tir de batteries sur les tranchées et les batteries ennemies qui étaient invisibles. Il fallait perfectionner la préparation des tirs en s'appuyant sur des cartes plus précises où le relief devait être représenté. Il était également indispensable de se représenter les positions ennemies. On ne pouvait aller les lever directement sur le terrain. On fit donc appel à la photographie aérienne alors débutante. Les avions volent bas, sont instables et prennent des photographies obliques qu'il faut ramener à l'horizontale. Cholesky fut engagé dans toutes ces opérations.

Les Groupes de canevas de tir furent créés vers la fin de 1914. Ils devaient fournir des cartes quadrillées, primordiales pour les calculs de pointage des artilleurs dont les objectifs étaient, le plus souvent, invisibles. Ils durent faire face à la prolifération des systèmes locaux de coordonnées. C'est pourquoi, le général directeur du Service géographique de l'armée demanda, par une note du 10 avril 1915, leur avis à ces groupes sur le choix d'une projection unique pour tout le front. La proposition du chef de bataillon Chicoyneau de Lavalette du Coëtlosquet, qui commandait le groupe de canevas de tir de la 1ère armée, fut retenue. Elle consistait à adopter la projection conforme de Johann Heinrich Lambert qui date de 1772. Cette méthode de projection permettait de représenter la surface sphérique de la Terre en conservant les angles, de ne pas déformer le terrain, de respecter les dimensions relatives, de conserver l'échelle des distances et les alignements afin de pouvoir calculer les coordonnées. La décision du 18 juin 1915 entérine ce choix.

Le 3 janvier 1915, Cholesky est détaché auprès du général commandant l'artillerie du 17ème corps d'armée pour l'organisation du tir. Le 11 février, il est affecté au Service géographique de l'armée pour être employé à un groupe de canevas de tir du détachement de l'armée des Vosges. Il rejoint son poste le 15 février. Il fut l'un des officiers qui comprit le mieux et développa le plus le rôle de la géodésie et de la topographie dans l'organisation des tirs d'artillerie. De nombreux documents relatifs à ces travaux se trouvent dans ses archives de l'École polytechnique. Il fit, comme attaché à la commission d'étude dirigée par le général Nourrisson, un certain nombre de conférences sur l'organisation du tir à des officiers d'artillerie (en mai 1915 avec le capitaine de Fontanges, puis à Saint-Dié en janvier 1916). Mais son activité ne se limitait pas là. Il s'intéressait également au repérage et à la surveillance des aéronefs, au point apparent d'émission des claquements des canons, à la photographie aérienne, aux appareils de pointage pour les mitrailleuses placées sur les avions Nieuport. Il rédigea un ensemble de notes sur ces

questions ainsi que des rapports sur l'utilisation des canevas de tir, sur le but des groupes de canevas et la répartition du travail en leur sein, sur l'emploi des contre-batteries, sur le tir d'artillerie contre des batteries masquées, sur la correction de pointage en combat aérien, sur le travail de l'officier cartographe, etc. Il commence à apprendre l'anglais.

En juillet 1916, il devient chef du Groupe des canevas de tir de la VIIe armée commandée par le général Étienne Godefroy Timoléon de Villaret (Saint-Laurent-Lolmie, 17 février 1854 - Angers, 18 janvier 1931).

Cholesky est affecté, du 25 septembre 1916 à février 1918, à la mission militaire en Roumanie (entrée en guerre à côté des alliés à la fin août) par décision du général Henri Mathias Berthelot (Feurs, 7 décembre 1861 - Paris, 28 janvier 1931), commandant en chef. Il y rend d'éminents services. Il y exerce les fonctions de directeur technique du service géographique et, sur plusieurs documents officiels, il est fait état du grade de lieutenant-colonel. En avril 1916, il s'installe au quartier général de la IIe armée à Bacau. Il organise complètement le Service géographique de l'armée roumaine. Divers dossiers, souvent épais, relatifs à cette organisation se trouvent dans les archives de l'École polytechnique. On y voit les talents d'organisateur et le souci des détails manifestés par Cholesky.

Le 6 juillet 1917, Cholesky est promu chef d'escadron, c'est-à-dire commandant. Le 17 décembre 1917, le colonel J. Pavelescu, chef du Service géographique de l'armée roumaine, le nomme *officier de l'ordre Steaua României avec épées* au cours d'un dîner d'adieu (sans doute à Jassy) offert à l'occasion du départ des Français de la Roumanie.

Le 5 juin 1918, il est affecté au 202ème régiment d'artillerie de campagne qui fait partie de l'armée du général Charles Mangin (Sarrebourg, 6 juillet 1866 - Paris, 12 mai 1925). Entre le 15 août et le 26 septembre, ce régiment participe à l'offensive sur la ligne Hindenburg. Cette ligne passe par Lassigny, Ribécourt-Dreslincourt et Tracy-le-Mont. Les Allemands y ont installé de nombreuses fortifications et y ont aménagé des carrières, des postes de commandement, des observatoires, des abris, mais aussi des cimetières et des hôpitaux.

Dans la nuit du 21 au 22 août, le 202ème régiment d'artillerie de campagne se porte dans la région de Montigny-Lengrain, puis dans celle de Morsains la nuit suivante. Le deuxième groupe, auquel appartient Cholesky, s'établit sur la croupe à l'est d'Épagny avec la mission d'établir un barrage devant les deux régiments alors en ligne. Son régiment est

engagé dans des combats sur l'Ailette le 23 août et à Courson. Le 25 août, l'armée de Mangin s'apprête à rompre le front ennemi entre l'Aisne et Saint-Gobain. Dans la région de Bagneux (un village de l'Aisne, à 10 km environ au nord de Soissons) , elle subit un bombardement presque continu d'obus toxiques. De nombreux hommes sont blessés. Le 27, on prend position dans les ravins de Bagneux. L'attaque est déclenchée le 29, à 5h 25 du matin. La progression était prévue jusqu'à Cerny-lès-Bucy près de Laon, mais elle est arrêtée à la voie ferrée. Les groupes qui devaient se porter en avant reprennent leurs anciennes positions vers 16h. Harcèlement sur le ravin des Loups et ratissage de nombreuses mitrailleuses.

Le 31 août 1918, le commandant Cholesky décède à 4h 30 du matin, ainsi que le lieutenant Marcel Desbrosses (né le 15 juillet 1895 à Héricourt en Haute-Saône), dans une carrière (peut-être le ravin des Loups) au nord de Bagneux, des suites de blessures reçues sur le champ de bataille (voir le journal de son unité aux adresses : http ://www.jmo.memoiredeshommes. sga.defense.gouv.fr/img-viewer/26_N_1022_004/viewer.html et http ://www.memoiredeshommes.sga.defense.gouv.fr/jmo/img-viewer/26_N_1022_004/viewer.htm). Il est inhumé au cimetière militaire de Chevillecourt près d'Autrèches dans l'Oise, à une quinzaine de kilomètres à l'ouest de Soissons. Le 12 octobre, il est cité à l'ordre de l'armée

> *Officier de la plus haute valeur par sa science, son mépris absolu du danger et le haut exemple donné à tous. A imprimé à son groupe une impulsion irrésistible. Tué à son poste de combat.*

Peut-être André Cholesky aurait-il été plus utile comme cartographe que comme commandant de batterie ?

Le 24 octobre 1921 son corps est transféré au cimetière de Cuts (dans l'Oise, à 10 km au sud-est de Noyon), tombe 348, carré A. Son nom est inscrit sur le monument aux morts de Saint-Martin-d'Ary en Charente-Maritime, sur une plaque commémorative à l'intérieur du Lycée Audouin-Dubreuil de Saint-Jean-d'Angély et sur le monument à la mémoire des polytechniciens morts pour la France dans la cour du ministère de la Recherche, 21 rue Descartes à Paris (ancienne École polytechnique).

La ligne Hindenburg est percée le 2 septembre 1918, au cours de la seconde bataille d'Arras.

Voici le début de la notice nécrologique rédigée en 1922 par le commandant Benoît

> *André-Louis Cholesky, né le 15 octobre 1875 à Montguyon (Charente-Inférieure), entra à l'École polytechnique à l'âge de vingt ans et en sortit dans l'arme de l'Artillerie. Affecté à la Section de géodésie du Service géographique, en juin 1905, il s'y fit remarquer de suite par une intelligence hors ligne, une grande facilité pour les travaux mathématiques, un esprit chercheur, des idées originales, parfois même paradoxales, mais toujours empreintes d'une grande élévation de sentiments et qu'il soutenait avec une extrême chaleur.*
>
> *C'était l'époque où la révision de toute la triangulation française venait d'être décidée pour faire suite à la révision de la Méridienne de Paris et pour servir de base à une nouvelle triangulation cadastrale. Le problème de la compensation des réseaux préoccupait bon nombre d'officiers de la Section, désireux de contribuer à fixer dans le sens de la rapidité, de la commodité et de la précision maxima, des méthodes qui n'étaient pas encore entièrement arrêtées. Cholesky aborda ce problème en apportant dans ses solutions, comme dans tout ce qu'il faisait, une originalité marquée. Il imagina pour la résolution des équations de condition par la méthode des moindres carrés un procédé de calcul très ingénieux qui rendit aussitôt de grands services et qu'il y aurait certes avantage pour tous les géodésiens à publier un jour.*

Cholesky était officier du Nicham Iftikhar (10 juin 1907), officier d'Académie (23 avril 1908), chevalier de la Légion d'honneur (10 avril 1915), titulaire de la Croix de guerre avec palme, officier de l'Étoile de Roumanie avec épées (17 décembre 1917), et décoré de l'ordre de Saint-Stanislas (6 août 1917) et du Nicham Medjidie.

On peut trouver les journaux des unités à l'adresse :
http ://www.memoiredeshommes.sga.defense.gouv.fr/

La méthode de Cholesky

Le nom de Cholesky est très largement connu (306.000 pages web, sans compter celles où son nom est mal orthographié) dans le monde

scientifique à cause d'une méthode particulière de résolution des systèmes symétriques d'équations linéaires dont il est l'inventeur. Naturellement, il n'est pas question de la décrire ici. Disons simplement qu'elle est toujours très largement utilisée de nos jours.

Cholesky fut amené par ses obligations de topographe à devoir résoudre de tels systèmes d'équations pour compenser les réseaux géodésiques. Les calculs devaient être effectués par de simples soldats, souvent sans aucune formation mathématique. La méthode devait donc être simple, compréhensible et surtout facile à mettre en œuvre. Cholesky avait à sa disposition des machines à calculer de type Dactyle qui furent construites par l'entreprise Château jusqu'au début des années 1950. Elles avaient été inventées par l'ingénieur suédois Willgodt Theophil Odhner (Dalby, Suède, 10 août 1845 - Saint-Pétersbourg, 15 septembre 1905) vers 1878. Le brevet étant tombé dans le domaine public en 1906, de nombreuses copies furent alors fabriquées dans le monde entier.

Cholesky ne publia jamais ses travaux bien qu'il ait rédigé lui-même des rapports sur les opérations de nivellement de précision qu'il dirigeait en Algérie et en Tunisie. Une méthode nouvelle pour le calcul de la correction de mire y est donnée mais il est bien difficile d'y voir les prémices de sa méthode de factorisation.

La méthode de Cholesky fut, en fait, exposée pour la première fois dans une note de 1924 due au commandant Benoît, de l'artillerie coloniale, ancien officier géodésien au Service géographique de l'armée et au Service géographique de l'Indochine, membre du Comité national français de géodésie et de géophysique (il n'a pas été possible de trouver des renseignements biographiques plus précis sur lui). Benoît écrit

> *Le Commandant d'Artillerie Cholesky, du Service géographique de l'armée, tué pendant la Grande Guerre, a imaginé, au cours de recherches sur la compensation des réseaux géodésiques, un procédé très ingénieux de résolution des équations dites normales, obtenues par application de la méthode des moindres carrés à des équations linéaires en nombre inférieur à celui des inconnues. Il en a conclu une méthode générale de résolution des équations linéaires.*
>
> *Nous suivrons, pour la démonstration de cette méthode, la progression même qui a servi au Commandant Cholesky pour l'imaginer.*

> *On sait que la* compensation *d'un réseau géodésique a pour but de tirer des valeurs angulaires d'observation un système* corrigé *tel que toutes les vérifications de figures soient satisfaites et que la figure géométrique ainsi obtenue déforme aussi peu que possible celle que donneraient les valeurs d'observation.*
>
> *Ces conditions de figure : fermeture des angles des différents triangles, égalités des longueurs obtenues pour un même côté quel que soit l'enchaînement suivi, donnent lieu à des équations dites* de condition *qui, développées par rapport aux corrections, peuvent être limitées au* 1*er ordre de petitesse.*
>
> *On a, en somme, à résoudre un système de p équations linéaires entre les n corrections angulaires, devenues les véritables inconnues, n étant plus grand que p, sans quoi il serait inutile de procéder à des observations, le problème serait indéterminé. On s'impose la condition supplémentaire, déjà mentionnée, de déformer le moins possible la figure d'observation, c'est-à-dire de satisfaire aux équations avec les valeurs les plus petites possibles des inconnues.*
>
> *On pourrait, pour cela, exprimer que la somme des* valeurs absolues *des inconnues est minima : mais cette condition ne se prête pas à une résolution algébrique commode et c'est la principale raison pour laquelle on préfère appliquer la méthode des* moindres carrés *de Legendre, qui donne d'ailleurs, en principe, le système correctif le plus probable...*

L'article de Benoît se continue par le *Résumé* suivant

> Résumé. - *En somme, les calculs très complexes par les méthodes ordinaires, y compris celle de Gauss, et qui nécessitent autant de tableaux distincts que d'inconnues à éliminer, d'où une complication d'écriture extrême, deviennent, par la méthode Cholesky et l'emploi de la machine à calculer, relativement aisés et beaucoup plus courts. Ils sont présentés sur un seul tableau, où l'ordre de formation est facile à reconnaître et où les opérations sont toujours les mêmes. On peut, avec cette méthode, aborder facilement des résolutions à 40 ou 50 inconnues, qui auraient demandé des semaines de travail ardu par les procédés antérieurs.*

Enfin, il est intéressant de citer le dernier paragraphe de l'analyse que Benoît fait de la méthode de son collègue

> Application de la méthode Cholesky à la résolution d'un système de p équations linéaires à p inconnues. - *Le système étant déterminé, n'a qu'une solution unique, que l'on obtiendra par suite, également, en recherchant la solution minima fournie par l'application de la méthode des moindres carrés. Le procédé de calcul du Commandant Cholesky peut dès lors s'adapter à la résolution d'un système d'équations linéaires quelconques.*
>
> *Mais cette adaptation est plus théorique que pratique, car elle entraîne à des calculs qui sont généralement plus longs que la résolution directe du système par une des méthodes habituelles : substitutions, éliminations, etc... Elle a cependant deux avantages assez importants : d'une part celui de réduire les écritures, et, d'autre part, de constituer une méthode homogène, d'application brutale, présentant des vérifications continuelles.*

L'article de Benoît se termine par un exemple numérique de compensation d'un quadrilatère par la méthode de Cholesky.

Donc, à cette époque, la seule trace de la méthode de Cholesky qui existait dans la littérature scientifique était cet article du commandant Benoît. Les géodésiens de l'époque utilisaient toujours la méthode de Gauss qui, ne tenant pas compte de la symétrie du système d'équations linéaires à résoudre, nécessitait deux fois plus de calculs. À cet égard, on peut voir, par exemple, l'un des ouvrages qui faisait alors autorité *Die Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate* (1872, seconde édition en 1907). Son auteur, Friedrich Robert Helmert (Freiberg, 31 juillet 1843 - Potsdam, 15 juin 1917), considéré comme le père des théories physiques et mathématiques de la géodésie moderne, y exposait la méthode de Gauss pour résoudre les systèmes provenant de l'ajustement des réseaux géodésiques par la méthode des moindres carrés. On sait que les habitudes tardent à disparaître et les nouveautés à s'imposer. La méthode de Cholesky mettra un certain temps à être connue, puis reconnue. Des années plus tard, elle n'était, semble-t-il, connue que des topographes comme en témoigne Henry Jensen (né le 7 octobre 1915 à Copenhague) qui, en 1944, cite l'article de Benoît. Elle fut sortie de l'oubli par John Todd (Carnacally, Irlande, 16 mai

1911 - Pasadena, 21 juin 2007) qui l'exposa dans son cours d'analyse numérique au King's College de Londres en 1946. Avec sa femme, la mathématicienne Olga Taussky (Olmütz, Empire Austro-Hongrois, 30 août 1906 - Pasadena, 7 octobre 1995), ils racontent

> *En 1946 l'un de nous* [John Todd] *donna un cours au King's College de Londres (KCL) sur les Mathématiques Numériques. Bien que nous ayons quelque expérience du temps de guerre en mathématiques numériques, incluant les valeurs propres de matrices, nous n'avions eu que peu affaire avec la résolution des systèmes d'équations linéaires. Afin de voir comment ce sujet pouvait être présenté, nous fîmes un examen de Math. Rev. (facile à cette époque !) et trouvâmes une analyse (MR 7 (1944), 488), d'un article de Henry Jensen, écrit par E. Bodewig. Jensen déclarait* la méthode de Cholesky semble posséder tous les avantages. *Ainsi il fut décidé de suivre Cholesky et, puisque la méthode était clairement exposée, nous n'essayâmes pas de trouver l'article original.*
>
> *Leslie Fox, alors dans la Division de Mathématiques nouvellement créée du (British) National Physical Laboratory (NPL), suivit le cours et apparemment trouva la méthode de Cholesky attractive puisqu'il la rapporta au NPL, où il l'étudia en profondeur avec ses collègues. À partir de ces articles la méthode de Cholesky (ou parfois Choleski) fît son chemin dans les boîtes à outils des algébristes numériques linéaires via les manuels des années 1950.*

Todd proposa un exercice sur cette méthode lors des examens du *B.A. Honours* et du *B.Sc. Special* en *Mathematics, Advanced Subjects - Numerical Methods* pour les internes du King's College en 1947. Puis il la porta à l'attention de Leslie Fox (Dewsbury, Yorkshire, 30 septembre 1918 - Oxford, 1er août 1992), Harry Douglas Huskey (né le 19 janvier 1916 à Bryson City, USA) et James Hardy Wilkinson (Strood, 27 septembre 1919 - Londres, 5 octobre 1986) qui en firent la première analyse. Sa stabilité (une propriété mathématique fondamentale pour quiconque effectue des calculs numériques) fut étudiée par Alan Mathison Turing (Paddington, Londres, 23 juin 1912 - Wilmslow, Cheshire, 7 juin 1954), l'un des pionniers de l'informatique et des ordinateurs. Ces divers travaux assurèrent le succès de la méthode de Cholesky (330.000 pages web en utilisant un moteur de recherche internet, sans compter les pages où le nom est mal orthographié).

Comme je l'ai dit au début de ce volume, j'avais écrit une première biographie de Cholesky dès que ses archives personnelles avaient été accessibles au public (c'est-à-dire 120 ans après son décès). Un collègue de l'université de La Réunion, Yves Dumont, avait créé un site internet dédié à Cholesky. Quelques années plus tard, il fut contacté par l'un des petit-fils de notre homme et je fus mis en contact avec lui. La famille se proposait de déposer aux archives de l'École polytechnique les documents qu'elle possédait et on me demandait d'aider au classement de ces archives. C'est ainsi que je rencontrais Michel Gross-Cholesky et que nous passâmes ensemble un certain nombre de journées à Palaiseau.

Quelle ne fut pas notre surprise quand nous découvrîmes le manuscrit original de la fameuse méthode de Cholesky dont personne ne soupçonnait l'existence. C'est un texte de 8 pages 21.8 × 32 cm (cote B4) où Cholesky expose parfaitement sa méthode. Il est intitulé *Sur la résolution numérique des systèmes d'équations linéaires* et porte la date du 2 décembre 1910. Ce manuscrit, contrairement aux autres manuscrits contenus dans le Fonds A. Cholesky, ne comporte presque pas de ratures. Seuls quelques mots sont rayés et remplacés par d'autres. On peut donc supposer qu'il ne s'agit pas là d'une première rédaction ; mais nous n'avons aucune indication sur la date réelle à laquelle Cholesky inventa sa méthode.

Cette note manuscrite de Cholesky constitue un travail d'analyse numérique complet et tout à fait remarquable pour l'époque (et même pour la nôtre) : présentation et justification théorique d'un algorithme, étude de la disposition pratique des calculs sur une feuille de papier, discussion des problèmes posés par la mise en œuvre sur machine à calculer, étude des erreurs numériques dues à la précision finie des calculs, procédure de vérification des résultats et commentaires sur les essais numériques.

Une belle découverte !

Carnets de campagne

Dans les documents laissés par Cholesky, on a retrouvé deux de ses carnets de campagne où il notait, au jour le jour, ses activités. Il m'a semblé intéressant de les reproduire ici presque *in extenso* car ils donnent une bonne idée de la vie quotidienne d'un topographe. Ces carnets sont

extraits du *Bulletin de la société des amis de la bibliothèque de l'École polytechnique*, numéro 39, décembre 2005, avec l'aimable autorisation de la direction de cette publication.

Ces carnets ont été écrits alors que Cholesky participait à la campagne de mesure du méridien de Lyon qui venait d'être entreprise dans le Rhône, le Dauphiné, l'Isère et les Cévennes.

Carnet no. 2

5 août 1905

Durand est parti à 5h1/2. Je monte au signal pour ma broche et construire ma mire. Je place mes deux chevrons et les deux planches extrêmes. Décidément, j'ai adopté le carré de 3 m. Mes diagonales égalisées, je laisse clouer le reste. Il faut que je fasse le maçon. J'ai fait un trou un peu plus grand pour ma broche qui entre d'ailleurs avec simple gravité ; comme je ne dispose que de très peu de plâtre, je cale donc des petits fragments de granit et je coule mon plâtre. Je retourne à ma mire mais les brumes qui nous environnaient commencent à crever. Il faut pourtant finir.

6h1/2. (un nom illisible) commence la peinture, pas longtemps, car il pleut maintenant et je suis obligé de faire rentrer tout le monde au camp. Je prépare les papiers pour demain. Et voici le fermier du Pilat avec lequel je règle mes comptes. Il a amené la voiture. Demain matin, on pourra charger à la première heure.

7h1/2. Voici une éclaircie. Je laisse les hommes à la préparation de leur soupe et de la mienne et je m'empare du pot de peinture. Je rentre à la nuit noire (les mains idem) (la mire idem). Tout va bien. Sauf la chaleur qui a reçu un rude à coup. Demain matin à la première heure, branle-bas de combat, souvenir du bled.

6 août

Début assez bon. Malgré la brume compacte et la bise plutôt aiguë. Le camp est assez vite levé et tout est chargé de telle sorte qu'à 8h la voiture peut partir dûment bâchée avec les toiles de tentes car il a plu a plusieurs reprises.

J'attendais avec anxiété ce départ avec la crainte non dissimulée de voir verser la voiture avant l'arrivée au chemin. Fort heureusement, avec mille précautions, on y arrive sans

encombre et nous laissons la voiture filer pour revenir à la mire. Ah, la pauvre mire, quelles belles pelles elle prend par deux fois avant de se tenir sur ses pieds. Tout de même, à la troisième reprise, nous la tenons. Elle est bien décentrée mais la maçonnerie de la base du pilier ne permet guère de la remuer. J'aime mieux mesurer le décentrage que d'essayer de la mieux placer. D'ailleurs, il est 11h1/2, il faut que je renvoie mes hommes pour qu'ils soient à Bourg-Argental avant 3h1/2. Je descends à la ferme pour déjeuner, espérant que Lunaçon (?) ne m'y laissera pas trop attendre. D'ailleurs, je partirai même s'il n'arrive pas, lui laissant un ordre pour rejoindre. Heureusement, le voici comme je commence à déjeuner. Après lui avoir montré ses points de repère, je pars.

Le Bessat : mon frein ne sert pas. Je perds un quart d'heure à essayer de le faire fonctionner. Sans résultat que de m'amener à la dernière minute si je veux prendre le train. Aussi, quelle allure ! Déconvenue, j'aperçois mes trois bonshommes qui trottent sur la route à environ 3km de Bourg et il est 3h-1/4. Mon matériel est encore sur la charrette et il faut renoncer à tout espoir de partir à 4h. J'ai peur que ce ne sois un jour de retard. Un pneu crevé.

Bourg-Argental. Rouspétance du fermier qui attendait depuis midi sans rien voir venir. J'entre en pourparlers avec le chef de gare qui vue ma tenue évidemment fort peu somptueuse manifeste une certaine méfiance. Enfin, le résultat, c'est que je supprime l'ordre de transport et j'amène tout le matériel avec moi comme bagages. Comme ça, je pars avec tout à 7h ce soir, tandis qu'autrement le matériel ne partirait que demain à 2h et mettrait probablement 3 jours à venir. Nombreuses distractions à Bourg où il y a grande fête. J'ai regardé danser un quadrille au bal champêtre. Je regrettais presque de partir. Je dors dans deux trains jusqu'à Rives où j'ai juste la force de me transporter à l'hôtel en face de la gare.

7 août

Départ à 5h20. Arrivée à Chabons vers 6h. Je fais immédiatement prévenir le bonhomme qui doit transporter le matériel. On charge cependant que je file à Biol. Arrêt 1h. Correspondance. Ascension du Haut-Biol. L'hôte de Ferrand m'arrête et non sans m'avoir offert un verre de vin blanc s'offre

à m'accompagner à la Charpenne. Il me gêne bien un peu mais enfin j'accepte : il pourra peut-être m'être utile pour entrer en relation avec les propriétaires de là-haut. J'ai fait le chassé-croisé avec Ferrand qui redescendait pendant que je montais. Je repère le centre de la face supérieure du pilier et je procède à un tour d'horizon préparatoire. Je ne peux plus rien faire. Je redescend boire un verre de vin qui remplacera peut-être le déjeuner absent. Heureusement, j'ai bouffé deux œufs à Biol. Enfin12h1/2, on entend des rumeurs, voilà le fourbi. Il faut encore décharger à moitié pour que les trois chevaux consentent à faire les 300 derniers mètres. Peu importe : armé du théodolite de reconnaissance, je procède à un tour d'horizon un peu plus sérieux. Guigne : le Granier et le Colombier que je vois bien ne peuvent pas du tout coller avec le Pilat. Celui-ci se trouve assez mal défini de sorte que je reste dans un vague qui est bien gênant.
Je place les punaises du théod, afin de faire quelque chose de plus sérieux. Malgré tout je n'ai encore que des calages un peu brumeux et je n'ai qu'une vague confiance dans les points de repère de direction que j'ai choisis.
Je règle la hausse des 3 miroirs et je fais l'instruction complète à Lumaçon qui est arrivé ici ce matin un peu avant moi et aussi à Ferrand que je me suis décidé à envoyer à Montellier à la place de Merle que je veux avoir avec moi pour le Granier et le Colombier.
La nuit me surprend préparant la mise en route de mes deux bonshommes. Il a fallu que j'engueule un peu tout le monde pour apaiser des discussions un peu tumultueuses. C'est sans doute pour cela que j'arrive à grand peine vers 9h à avoir un peu de soupe et une omelette. Heureusement que je n'ai pas déjeuné à midi, je suis préparé à un mauvais souper. Puis j'ai assez à faire pour partir demain matin à Boussuivre.
8 août
Après avoir aligné un miroir sur Boussuivre et réglé l'emploi de la journée, ...je pars pour Bourgoin. Réparé mon pneu dans le fourgon de Lyon à Tarare.

Déjeuner à Tarare. Digestif violent : 9 km de côte sans boire aussi je me rattrape largement à Violay. Le soleil est joliment vigoureux pour monter à Boussuivre. Nous y arrivons

vers 3h-1/4. Je m'oriente de suite avec la carte et j'aperçois bientôt dans la jumelle deux éclairs.

Je monte mon miroir en faisant l'instruction à (un nom illisible). Horreur mon miroir a une collimation qui me paraît être de 4 mm. Je rectifie celui-ci tant bien que mal car je ne vois pas le feu de Charpenne, mais que vont faire mes deux autres miroirs ?

Je rentre à Charpenne un peu navré de ma découverte . Verront-ils mon feu demain et seront-ils assez malins, s'ils ont une erreur, pour la rectifier ?

J'ai pointé le miroir avec -5 au lieu de -9 pente de Charpenne ou de Boussuivre.

9 août

Charpenne. Je suis arrivé à 3h du matin après avoir attendu ma bicyclette de 9h1/4 à 12h à Bourgoin. Guigne. Veine : je trouve Durand en rentrant.

Longue (un mot illisible). Court anormale. Matinée peu fructueuse. Correspondance- Quelconque. Nous ne travaillerons qu'à 11h.

11h. Baraque. Le problème devient palpitant. Pilat a éclairé merveilleusement dès le matin ; alors que signifie l'erreur de Boussuivre ? Les deux autres vont-ils se montrer ? J'ai confiance que Boussuivre sera vu puisque j'y suis allé. C'est la moindre des choses.

Durand et (un nom illisible)- 2 ou 3 minutes à peine se passent et j'aperçois Boussuivre dans la lunette. Voila qui est bon. On lui fait des points et de suite, on éclaire Montellier qui répond aussi et merveilleusement au bout de 10 minutes. Bref, nous avons commencé à 11h1/4 et à 12h20 nos trois miroirs rivalisent de feu.

A 6h-1/4, les miroirs marchent moins bien, le vent peut-être. Je descends à (un mot illisible). Tout va bien.

10 août

Repos à Chabons Je comptais partir pour le Granier.

Mes deux hommes arrivent dans l'après-midi après le dernier train qui me permet de coucher à Chapareillan. Je les envoie coucher à Grand Lemps. Je rejoindrai moi-même dans la nuit. La bécane a du bon.

11 août

Quelques gouttes de pluie dans la nuit noire qui me porte avec ma bicyclette à Grand Lemps. Mes deux lascars sont à la gare. Départ 2h20. 1h d'arrêt à Grenoble. Je fais connaissance de la ville de la gare à la place V.H. et des bords de l'Isère. Impression excellente. Voyage de Chapareillan très séduisant malgré les brumes et la pluie.

Chapareillan ; maire très gentil, tout semble aller à souhait ; cependant je ne pars qu'à 9h1/2 et je ne sais pas trop ce que je trouverai là-haut. Je sais seulement que les deux charpentiers devaient avoir fini planches et chevrons ce matin mais il a fait bien mauvais temps depuis Grenoble. Les trouverai-je. Il faut monter. Nous arrivons à 1h à la falaise.

Déjeuner, il est grand temps. D'autant plus qu'il pleut à torrent : c'est un retour de l'orage qui nous a arrêté vers 11h. Pourvu que ça ne dure pas.

2h. Nous nous remettons en route mais il faut transporter en haut planches et chevrons que nous avons trouvés ici. Et le temps reste très menaçant. L'expérience n'est d'ailleurs pas heureuse. La pluie reprend bientôt. Nous essayons de lutter mais trempés de sueur et de pluie nous ne pouvons aller bien loin. Mes hommes me demandent de retourner à la cabane de berger qui est à quelques centaines de mètres plus bas. Je me rends.

C'est doux de trouver un bon feu, même au mois d'août dans ces parages hospitaliers ; mais quand on s'en est approché, il ne faut plus songer à le quitter ; pourtant nous n'avions pas de pain mais l'eau bien fraîche de la montagne suffisait pour avoir la conviction que nous ne sortirions de là qu'avec le beau temps. Le soir vient vite. J'espère encore que la nuit ramènera le beau temps et comme nous avons de la lune jusqu'à minuit, je caresse l'espoir de monter ma mire au clair de lune et de redescendre avec ma lampe à acétylène que j'ai transportée avec moi. 8h. Nuit noire, la pluie continue avec la même ardeur. Il n'y a plus qu'à songer à se reposer. Je m'étends les pieds au feu avec un tampon de paille sous les hanches et la tête sur mon sac. Je ne sais pas combien de fois j'ai changé de position pendant la nuit. J'ai dormi pourtant et même assez pour me reposer un peu.

12 août

Au jour, j'ouvre la porte de la hutte. Le temps, sans être beau, semble promettre une amélioration. Je vais chercher dans le panier au (sic) provisions le pain qui restait hier à mes hommes qui dorment encore. Pour moi, j'en croque un petit croûton que j'avais glissé dans ma poche après mon déjeuner d'hier dans le but de raccourcir la descente.

5h. Nous reprenons l'ascension. Arrivé le 1er dans un brouillard qui ne me permet pas de juger de mon avance, je me mets à déblayer le tas de pierres que je devine être l'ancien signal. J'ai le temps de retrouver sous 1 m 50 de pierres la borne un peu mutilée par le temps que je prépare à recevoir le repère en bronze. Enfin, voilà mes hommes avec leur chargement de bois ; je renvoie notre vieux guide (qui commence à faire un peu de peine) chercher l'eau qui nous manque pour gâcher le ciment, et nous nous mettons à construire la mire.

La mise en place ne s'effectue pas sans difficulté. Le bois est vert et lourd et nous ne sommes que 3 car notre vieux bonhomme est tout à fait incapable de nous aider. Il tient à peine sur ses jambes. Enfin, je me vois obligé d'aller chercher sur mes épaules un sapin qui servait de poteau indicateur et dont je veux faire un étai de repos. Grâce à ce nouvel aide, nous dressons enfin la mire. Après les derniers arrangements, nous redescendons à 2h.

Ah ! quel déjeuner !

4h. Nouveau départ direction du Colombier. Beau voyage Chambéry Aix. Longs pourparlers à Culoz avec les employés qui veulent me persuader que c'est facile de faire l'ascension de Culoz, mais je me méfie, je veux aller à Virieu le Petit. Coucher à Artemare.

13 août. Dimanche

Arrivée en voiture à Virieu à 8h. Très beau temps. Je me dis que je vais regagner le temps perdu au Granier ; mais cet espoir est de peu de durée. Après une courte conversation avec le maire, il m'apparaît clairement qu'il n'y a rien à espérer pour aujourd'hui. La chaleur ne convient pas aux bœufs. J'entreprends l'ascension à 11h avec le conseiller municipal qui allant foirier m'a proposé de me guider et de me mettre en relations avec les gens que je puis utiliser demain.

C'est chaud, mais quelle plaine à côté du Granier !

Tout est combiné, je fais la reconnaissance de mon chantier et je suis de retour à 5h.

14 août

Nouveau départ à 3h.

Nous extrayons la pierre du pilier dès notre arrivée au sommet ; nous avons d'ailleurs largement le temps car le matériel n'arrive qu'à 9h et encore la dernière partie du trajet doit être faite à dos. Enfin, tout est en train. Le pilier me donne tout d'abord des inquiétudes par sa lenteur à s'élever mais enfin, il s'élance. La mire monte lentement mais sans accident. Mon miroir est enfin aligné. J'aperçois quelques points sous mauvais feu mais comme j'ai vu un très bon feu, je suis sûr de ce qui est fait. Je redescends enfin. 5h-1/4. A 6h je suis à table avec l'espoir de prendre à Artemare le train de 8h qui par Lyon me mettra à Chabons vers 3h du matin.

15 août

Je ne peux même pas faire la grasse matinée, le grand jour me tire du lit. Toutefois, je n'ai nulle envie d'aller à Charpenne à bicyclette. Il fait trop chaud. Nous irons ce soir en voiture. Voyage à Haut Biol. Je rencontre Durand qui malgré nos exhortations retourne au camp après dîner.

16 août

Me voila reparti sur Boussuivre. En passant à Lyon, j'essaye d'avoir les mulets pour le Granier. Sans succès, d'ailleurs.

Au départ de Lyon, orage violent. Je suis inquiet sur le succès de ma journée. Je monte brillamment la côte de Boussuivre mais il ne fait toujours pas de soleil.

6h30. Je redescends du signal. Me voici obligé de coucher à Violay. Pourvu que ce temps ne dure pas trop longtemps.

17 août

Il a plu toute la nuit et il pleut toujours. Je regarde mélancoliquement passer les nuages guettant avec anxiété l'arrivée de l'éclaircie ; mais voici 1h ; j'ai eu tort de passer mon déjeuner car il pleut encore. Je me demande si je dois encore insister à rester ici. Pourtant...

Carnet no. 3

24 juillet

Pierre sur Haute. Mesure des éléments de décentrage.

25 juillet

Installation du miroir pour Mt Pilat sur un pilier auxiliaire et d'une mire plate dans la verticale du miroir.

La baraque est beaucoup plus loin que cela.

28 juillet

Le Montellier (château). Arrivée au pilier à 8h. Le miroir est orienté à gauche et trop haut. Orientation à 1cm de la feuille de centrage. Le Pilat était visible, il a disparu complètement. 9h- Pointage en hauteur par rapport à la crête en avant au S.E. de (un nom illisible) côte 310...

11h. J'ai aperçu deux éclairs mais très fugitifs Plus rien. Je vérifie mes calculs.

Le Pilat est visible. Je cherche le signal d'après la carte. Il m'a semblé que ma feuille de centrage n'était pas suffisamment exacte (difficulté d'orientation par rapport à 3 points visibles). Le château de Montellier n'était pas un signal de la carte au 80000ème et on a été obligé de le reporter sur la carte au 200000ème où il n'existait pas. Il m'a semblé que je pointais à gauche. Je vois nettement à droite de mon repère un sommet qui dans la jumelle a bien la forme du Crêt de la Perdrix ; il paraît bas mais, d'après la carte, je pense qu'il prend en effet plus bas que le (un mot illisible).

11h30. Je déplace mon miroir vers la droite sur le crêt reconnu, 4 mm à droite du repère primitif.

11h40. Je vois (illisible). Ca va bien.

Pour modifier ma direction sans changer autant que possible ma hauteur, la rigidité du bâti m'a gêné. J'étais obligé de me faire un petit levier à l'arrière avec ma lame de canif pour arriver à voir un repère sur la crête en avant à l'intérieur de la pinnule.

Mt de Bar- 30 juillet

Arrivée au pilier à 12h40. La planchette paraît un peu à droite et trop basse. Orientation à l'aide de la feuille de centrage. La hauteur absolue calculée paraît bonne, mais la hauteur par rapport à la crête de Bellevue paraît nettement

fausse. Je recommence les calculs et retrouve le même résultat. ? ? ? ? (voir la carte au 80000ème). La planchette est clouée sur une planche destinée à augmenter sa distance au pilier et munie d'une bonnette pour empêcher le soleil de la frapper. 2h1/2. La planchette est à très peu près fixée en hauteur. Par oscillation autour d'un point placé au milieu de la planche. J'ai fait placer la planchette nettement à gauche de manière à être obligé de forcer beaucoup pour l'amener en direction et assurer ainsi un bon calage à l'aide d'une autre planche clouée perpendiculairement à la première sur un autre côté du plancher de la charpente.

3h. Mon feu est dirigé sur le Pilat où je n'ai encore absolument rien vu.

3h15. Ca y est, on me fait des points. Je fais bondir Lunaçon (?) pour fixer complètement mes pointes.

3h40. Depuis les points, mon feu a dû être à peu près continu et je n'ai rien revu au Pilat... Je m'en vais.

11 et 12 août

Installation d'une mire au Granier et mise en place d'un repère sur l'ancienne borne des I.G. La borne était un peu abîmée au sommet. Je l'ai fait casser pour arriver à une partie solide. La mire est à très peu près dans l'axe de Charpenne et 168 mm plus loin.

14 août

Construction du pilier du Colombier et installation d'une mire. La borne des I.G. était magnifiquement conservée. La mire est rigoureusement centrée sur le repère.

17 août

Boussuivre mauvais temps.

19 août

id le matin

le soir, je rectifie le miroir sur un signal de la carte au 80000ème et je rejoins Charpenne. Le miroir a marché le lendemain.

27 août

Montellier. Le miroir Durand est resté dehors, le bois a travaillé et il y a du jeu dans la charnière. Je rectifie la direction mais je pars sans confiance.

28 août

La mire du Colombier est tombée ; elle est remplacée comme primitivement ; le vent l'a couchée doucement en remontant une pierre fixée à un fil de fer. Rien n'a changé.

2 septembre

Par suite de l'abandon de la station du Granier, la mire du Colombier doit être retournée sur Montellier...

4 et 5 septembre

Construction du pilier à Nivigne. Dimensions sur feuille d'orientation. Le miroir a été aligné d'après la carte et la pente calculée, je n'ai vu aucun feu.

6 7bre

Reconnaissance du Crêt de la Neige. Du sommet le plus élevé, on voit bien, sauf dans une direction qui, après orientation approximative, paraît très voisine de celle de Montellier. Je m'oriente aussi bien que possible et la visée me paraît alors très rasante. Je renonce à ce sommet. La pointe plus au sud me paraît plus basse de 2 m environ ; mais je suis sûr de voir toutes les directions.

7 7bre

Construction de la mire du Crêt de la Neige. Installation du miroir toujours sans rien voir.

10 7bre

La mire du Colombier a projeté sur la seule partie noire du Mont Blanc. Celle du Granier est absolument invisible se projetant sur ma pointe noire du Belledone. Après conférence avec le Commt, je vais retourner au Granier.

12 7bre

Mon ordonnance rappelé du Crêt de la Neige n'arrive pas. Le temps se couvre. L'ascension du Granier paraît menacée...

13 7bre

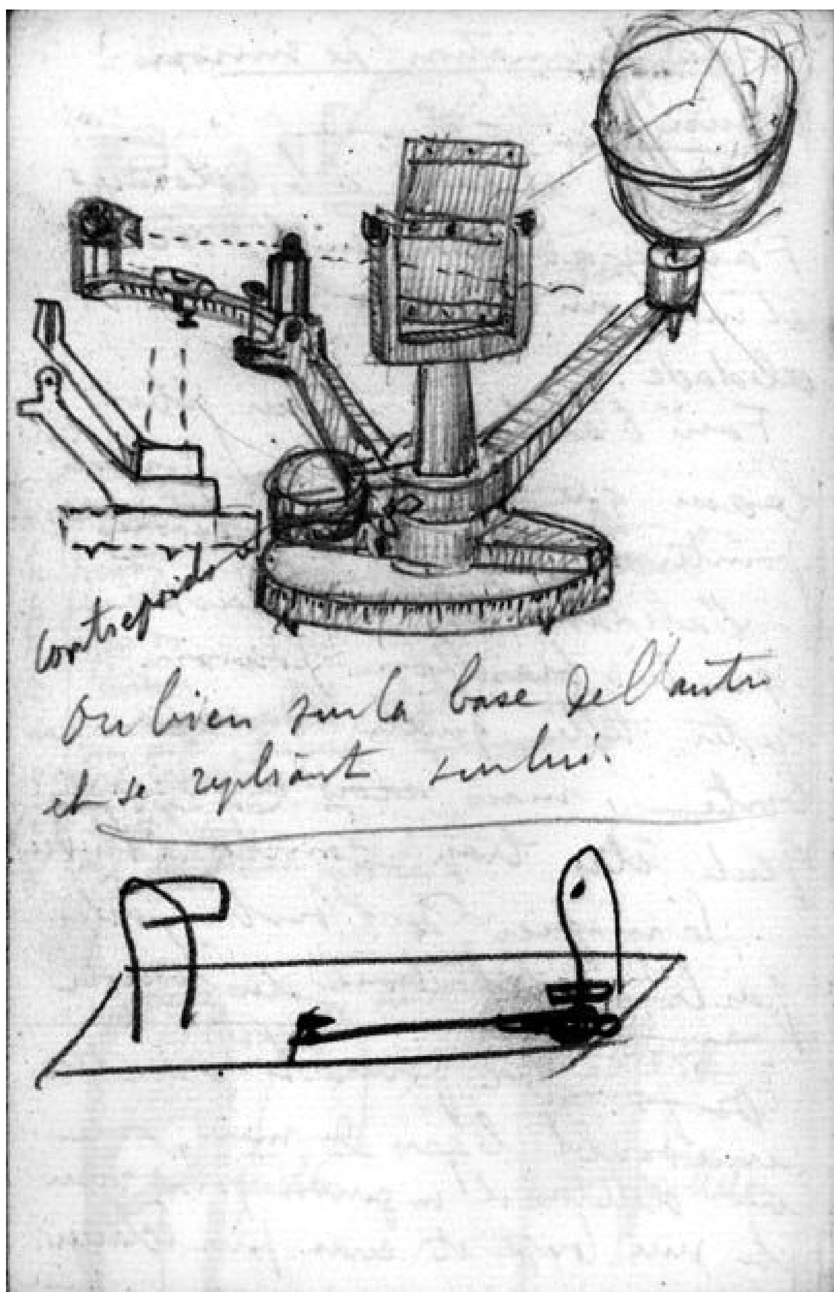
Arrivée à Chapareillan sous une pluie torrentielle, je suis crotté des pieds à la tête et trempé. L'ascension paraît de plus en plus lointaine.

14 7bre

Pluie ininterrompue et vigoureuse toute la journée.

Granier 17 et 18 7bbre

Replacé la mire. La visée de Montellier passe 1 centimètre au sud du repère. Posé héliostat sur dalle en pierre dont la face supérieure est à 108 millimètres au-dessus du repère...



Page d'un carnet de Cholesky

Documents militaires

Ces documents proviennent des Archives du Service historique de l'armée de terre, Dossier 126.454, Service historique de l'armée de terre, Fort vieux de Vincennes.

Citations

– *Citation n. 148 à l'ordre de la IV ième Armée le 21 décembre 1914 (J.O. du 14 janvier 1915)*
Le Général commandant la IVème Armée cite à l'ordre de l'armée pour les faits suivants : le Capitaine Cholesky André : Envoyé le 8 décembre auprès du Lieutenant-Colonel directeur des attaques du 83ème, pour lui indiquer le moment où l'attaque pouvait se déclencher ; sa mission terminée est resté volontairement auprès de cet officier supérieur pour lui servir d'adjoint, et, sous un feu intense, a fait ce service jusqu'au lendemain neuf heures, dans nos tranchées et dans les tranchées ennemies dont on venait de s'emparer. Officier d'Artillerie exceptionnellement doué, dont les multiples observations ont puissamment contribué depuis un mois a donner à notre artillerie une supériorité complète sur l'artillerie ennemie.

– *Citation n. 561 à l'ordre du 17 ième Corps d'Armée*
Le Général commandant l'artillerie cite à l'ordre de l'artillerie du 17ème Corps d'Armée le Capitaine Cholesky du 23ème Régiment d'Artillerie pour le motif suivant : a fait preuve d'activité, d'initiative, et de talent en organisant la centralisation dans l'artillerie du 17ème Corps d'Armée des services des transmissions, de l'observation et du tir.

– *Citation n. 344 à l'ordre de l'Armée du 12 octobre 1918*
Officier de la plus haute valeur par sa science, son mépris absolu du danger et le haut exemple donné à tous. A imprimé à son groupe une impulsion irrésistible. Tué à son poste de combat.

Feuillet individuel de campagne

– **Résumé des notes antérieures à l'année 1910**
Sorti de Fontainebleau avec le n. 4 sur 92 en 1898. Se présente bien, sert avec zèle et entrain, un peu étourdi, monte bien à cheval. Deviendra un bon officier.
Détaché au service géographique de l'armée en Tunisie

en 1902, 1903-04-05 à titre temporaire, est définitivement affecté à ce service le 24 janvier 1905. Très bien noté. Nommé Capitaine le 25 mars 1909, il est affecté au 13ème Régiment d'Artillerie par décision ministérielle du 28 août suivant. Bonne impression dès le début.
Le Colonel Grand-Didier.

- **Copie des notes du feuillet du personnel**
  - **1910**
    Avril. Tempérament robuste, intelligence vive, esprit net et réfléchi. Caractère très franc, bienveillant et ferme, le Capitaine Cholesky s'occupe avec beaucoup de soin de l'instruction et de l'administration de sa Compagnie. Bien qu'ayant été longtemps détaché, s'est mis rapidement au courant du service de la troupe. Connaît très bien son personnel. Fera un très bon Capitaine.
    Le Colonel Grand-Didier.
    Mai. Notes obtenues au cours régional de tir de la Courtine du 25 avril au 4 mai 1910 : aptitude de l'officier au point de vue du tir, au début de la série : bien préparé - zèle et progrès constants, très satisfaisants - Aptitude à la fin du cours à remplir les fonctions de commandant de Compagnie : très apte à remplir au tir les fonctions de commandant de Compagnie.
    Le Chef d'Escadron Vincent, Directeur de l'instruction militaire à l'École polytechnique, Directeur du cours.
    Octobre. Le Capitaine Cholesky commande sa section avec beaucoup de zèle, de fermeté et de bienveillance ; il a obtenu de très bons résultats qui pourront encore être améliorés par une surveillance plus serrée de certains détails. Très versé dans toutes les questions de tir, il tire avec calme et observe bien ; il sera aux prochaines écoles de feu un des meilleurs tireurs du régiment. A donné, aux manœuvres de Picardie, toute satisfaction à son chef de groupe.
    Le Colonel Grand-Didier.
  - **1911**
    Avril. Esprit méthodique, très réfléchi, le Capitaine Cholesky a du calme, du sang-froid, et beaucoup d'initiative. La batterie est bien tenue, bien instruite et bien

administrée. Il commande d'une façon brillante sa batterie au tir ; il observe sûrement et a la décision prompte.
Le Colonel Grand-Didier.

Second brillant Capitaine et très bon tireur, ne négligeant aucun détail aussi bien dans l'administration que dans des questions d'instruction et d'entretien du personnel, le Capitaine Cholesky, qui vient d'être l'objet d'une mutation, pour le service géographique, quitte le régiment avec une connaissance parfaite à tous égards des fonctions de Capitaine.
Le Lieutenant Colonel [illisible].

– **1912**
Classé à l'état major particulier de l'artillerie pour être détaché à la Direction du Service Géographique par décision ministérielle du 24 septembre 1912.
<u>Avril</u>. Arrivé au Service Géographique de l'armée au mois d'octobre, le Capitaine Cholesky a été classé à la section de Géodésie où il avait déjà été apprécié de 1905 à 1909. Chargé de la direction des opérations de nivellement de précision en Algérie et en Tunisie, il a rempli ses fonctions avec une autorité et une compétence remarquables. Esprit scientifique, toujours en éveil et au travail.
Le Chef d'Escadron, Chef de la Section de Géodésie, Lallemand.
<u>Octobre</u>. Le Capitaine Cholesky a pris part aux manœuvres d'armée comme officier cartographe (état major du Général Marion) ; a mérité d'excellentes notes ; officier remarquable en tous points. Proposé pour Chevalier de la Légion d'Honneur.
Le Lieutenant Colonel, Chef de la Section de Géodésie, Lallemand.

– **1913**
<u>Avril</u>. A continué à diriger les opérations du nivellement de précision en Algérie et en Tunisie avec un zèle et une compétence remarquables ; parait devoir obtenir une place à la Direction des Travaux Publics du Gouvernement Tunisien, comme chef du service topographique. Le Service Géographique et l'armée ne pourront que regret-

ter son départ, les officiers de cette valeur étant rares.
Le Lieutenant Colonel, Chef de la Section de Géodésie, Lallemand.

Rayé des contrôles du Service Géographique le 25 mai 1913, mis hors cadre, à la disposition du Ministre des Affaires étrangères (Chef du Service Topographique de la Régence de Tunis. Décision ministérielle du 4 juin 1913).
Lallemand.

– **1914**
A été affecté à un emploi de Capitaine au 7ème groupe d'artillerie à pied de Bizerte, en cas de mobilisation. A commandé la 10ème batterie du dépôt depuis son arrivée au corps. Affecté au 16ème Régiment d'Artillerie de Campagne (dépôt d'Issoire). Dirigé le 15 septembre sur son nouveau poste. Tel. 119ms du Général Commandant en chef des troupes de l'Afrique du Nord. Reçu le 10 septembre.
Bizerte, le 13 septembre 1914. Le Commandant du 7ème groupe, L. Viane [?].

Rejoint le 23ème d'artillerie à Somme-Suippe (Marne) le 23 septembre ; prend le commandement du 3ème groupe le 27 septembre, puis celui de la 9ème batterie le 18 octobre à l'arrivée du Chef d'Escadron Girard. Esprit très positif, très renseigné, très travailleur ; a montré dès le début une grande activité aussi bien dans l'organisation de sa batterie et l'installation de ses bivouacs que dans la réalisation du tir contre avions ou le fonctionnement des observatoires : tire bien, observe bien - Chargé le 4 janvier 1915 de la confection du plan. Directeur du tir du C.A. [Corps d'Armée] et de la direction de l'observation du tir. Classé fin janvier au service géographique - Quitte le régiment au moment où il était en excellente situation soit pour l'avancement soit pour la Croix.
Le Lieutenant Colonel Malet.

– **1915**
10 février 1915. Le Capitaine Cholesky a fait preuve d'une connaissance très complète de tout ce qui concerne

l'organisation du tir, de l'observation et du service des transmissions. Il a déployé une activité et un talent d'organisation remarquables dans le courant de janvier et jusqu'au moment de son départ.
Le Général commandant l'artillerie du 17è C.A., Falque.

Officier remarquablement doué, à l'esprit toujours en éveil, aux idées originales, le plus souvent fécondes dans leur application. A été pour le chef du groupe des canevas de tir de la 7ème armée un collaborateur parfaitement au courant de toutes les questions techniques, ardent à sa tâche. A contribué pour une grande part à tous les résultats obtenus. Très qualifié pour le grade supérieur.
Le Général de Boissoudre, Chef E.M. 7ème armée.

– **1916**
Pendant le 1er semestre 1916, le Capitaine Cholesky a continué à faire preuve des mêmes qualités. Il prend aujourd'hui le commandement du groupe des canevas de tir de la 7 ième armée pour lequel il est parfaitement qualifié. Il devra toutefois se méfier comme chef de service de quelque tendance à l'originalité et au paradoxe. Il doit être laissé le moins longtemps possible dans le grade de Capitaine, les officiers de sa valeur étant rares. Il figurera partout, dans un service technique comme dans la troupe avec éclat et honneur.
Le Chef d'Escadron, chef du groupe des canevas de tir, Perrier . Le 26 mai 1916.

A dirigé avec compétence le G.C.T.A.. Travailleur, ingénieux, réfléchi, a développé largement la production du groupe et a pris des initiatives heureuses. En somme, a très bien servi dans la succession du Commandant Perrier.
Le Lieutenant Colonel Hergault, chef d'E.M. 7è Armée, le 24 octobre 1916.

– **1917**
Directeur Technique du Service Géographique en Roumanie, a pris dès son arrivée la haute main sur ce service secouant les torpeurs, triplant la production et assurant la continuité du travail malgré le transfert des ser-

vices par suite des opérations. Fait honneur au Service Géographique français, actif, énergique, homme d'autorité, a trouvé ici le plein développement de sa personnalité. Sa nomination, déjà tardive, ne doit plus être différée.
Au GQG roumain, le 25 janvier 1918, le Colonel Pétin, chef d'E.M..

– **1918**
Mêmes excellentes notes.
Le chef d'E.M. Pétin.

A continué jusqu'au départ de Roumanie de la Mission Française à diriger avec autorité et compétence les services géographiques de l'armée roumaine. A acquis de par ces fonctions, tous les titres à exercer en France un emploi exigeant de l'initiative.
Le chef d'E.M. Mission Roumaine, Colonel V. Pétin.

Relevé des notes

Ces relevés sont la transcription du feuillet individuel de campagne. Seul s'y ajoute ce qui suit.

Proposé pour le grade de Chef d'Escadron avec le motif suivant :
Mérite grandement d'être nommé immédiatement au grade supérieur. 8 ans de grade de Capitaine ne feront pas de sa nomination un choix exceptionnel que mériterait cependant sa personnalité. Ardent, énergique, travailleur infatigable, ayant beaucoup d'autorité. Fait honneur à la Mission dans les fonctions dont il est chargé.
Le Général Berthelot, Chef de la Mission Militaire en Roumanie.

Une région : Les Alpes et le Mont-Blanc

De même qu'il avait été intéressant de consacrer un chapitre à la vie et les travaux d'un topographe, Cholesky, il est intéressant d'en consacrer un autre à l'étude du développement de la cartographie d'un lieu précis. J'ai choisi les Alpes, le Mont-Blanc en particulier, parce que, d'abord, c'est une région que j'aime ; l'auteur a bien droit à certains privilèges ! Ensuite pour son intérêt intrinsèque, son histoire, la difficulté de sa cartographie (sans doute plus aventureuse que celle de la Beauce) et surtout afin de pouvoir m'appuyer sur le magnifique travail de Laura et Giorgio Aliprandi, ainsi que sur les livres de Philippe Joutard, de Charles Durier (dans l'édition annotée par Joseph et Charles Vallot), du célèbre alpiniste Gaston Rébuffat et sur l'article de Paul Guichonnet (voir Biblio).

Les anciennes représentations

Les premières cartes n'ont pour but que de permettre la circulation des voyageurs (en majorité des pèlerins) et des marchandises à travers les Alpes. Après avoir vaincu les Carthaginois à l'issue des guerres puniques (entre 264 et 146 av. J.-C.), les Romains s'installent en Provence avant de remonter peu à peu la vallée du Rhône. Afin d'éviter un trop long chemin, ils sont confrontés au problème de la traversée des Alpes. Il leur faut trouver des itinéraires sûrs (à cause de l'hostilité des montagnards celtiques), directs et rapides. Après la conquête des Alpes-Maritimes (14 av. J.-C.), l'empereur Auguste fait ouvrir la *via Julia Augusta* entre Piacenza et le Rhône. Elle relie Cueno à Vintimille en passant par le col de Tende (1.871 m). Entre Turin et la Durance, les cols de Larche et Mont-Genèvre sont aménagés. Après la soumission des Salasses de la vallée d'Aoste en 25 av. J.-C., le col du Petit-Saint-Bernard permet aux Romains d'accéder à l'Isère. La voie du col du Grand-Saint-Bernard

(*Summo Poenino*) relie la vallée d'Aoste à Genève, par Martigny. Malgré son altitude (2.469 m) cette route devient la plus fréquentée entre l'Italie, la Rhénanie et la Grande-Bretagne. Les cols du Simplon et du Saint-Gothard ne seront aménagés que beaucoup plus tard. La liaison entre la Lombardie et l'Allemagne s'effectue par les cols du Splügen (2.113 m), entre la vallée du Rhin antérieur et le lac de Côme, du Julier (2.284 m) qui relie Tiefencastel à Silvaplana dans les Grisons, et du Septimer (2.310 m) qui joint Casaccia, dans le Val Bresgaglia, et Bivio. Dans les Alpes orientales, les vallées de l'Adige et de l'Inn sont mises en communication par le col de Resia (1.504 m) et par celui du Brenner (1.372 m). À l'est, la Norique, limitée au nord par le Danube, à l'ouest par la Rhétie, à l'est par la Pannonie et au sud par la Dalmatie, est en relation avec l'Adriatique par les cols du Monte-Croce (1.362 m) et de Tarvis (1.073 m). En 1852, on découvrit au Larioz (entre Saint-Gervais et le col de la Forclaz) un pierre plate comportant une inscription romaine. Elle est datée du cinquième tribunat de Vespasien, qui prit fin le 1er juillet 74. La civilisation romaine avait donc bien pénétré la vallée de Chamonix. Des médailles trouvées sur les trajets des cols du Bonhomme et de la Seigne prouvent qu'ils étaient alors fréquentés.

Après la fin de l'Empire romain, les régions alpines se referment sur elles-mêmes d'une part à cause de l'expansion arabe autour de la Méditerranée et, d'autre part, à cause du refroidissement qui saisit l'Europe entre les années 400 et 750. Le réchauffement se fera sentir à partir de la moitié du VIIIe siècle, il sera à son maximum au XIIIe siècle et se poursuivra jusqu'aux environs de 1500. L'activité reprend. De 1096 à 1270, huit croisades empruntent la route des Alpes. Le difficile passage du Saint-Gothard est aménagé entre 1218 et 1225. Puis arrive le « petit Âge glaciaire », avec une baisse de 3 à 5 degrés annuellement. Il s'amorce vers 1500, s'accentue à la fin du XVIe siècle, atteint son apogée après 1600 et dure jusque vers 1680. Ces phénomènes climatiques retardent l'établissement de cartes des Alpes. L'urbanisation des Alpes commence au XIIIe siècle. À l'occident, elle s'appuie souvent sur les cités romaines existantes : Suse, Briançon, Aoste, Martigny. Dans les Alpes centrales, les villes se développent surtout à la périphérie : Côme, Lucerne, Sain-Gall. Le phénomène est plus tardif dans l'est du massif.

Les Alpes sont visibles sur les feuillets 3 et 4 de la Table de Peutinger. Les montagnes y sont représentées en dents de scie. Sept cols sont mentionnés avec les parcours correspondants : la Turbie ou le col de Tende, le Mont-Genèvre, le Petit et le Grand-Saint-Bernard, le Saint-Gothard,

le Splügen et le col du Pero. Aoste et Lyon sont des carrefours. Deux routes partent d'Aoste, l'une vers Martigny par le Grand-Saint-Bernard et l'autre vers Bourg Saint-Maurice par le Petit-Saint-Bernard.

À l'intention des pèlerins qui doivent se rendre à Rome pour l'année sainte 1500, Erhard Etzlaub (Erfurt, ca. 1455-1465 - Nuremberg, 1532), un astronome, cartographe, et fabricant de boussoles, publie, en 1492, une carte-itinéraire appelée *Rom-Weg*, de 41 cm par 29 cm, gravée sur bois. Elle s'étend de Copenhague à Naples et de Paris à Cracovie. Aucune longitude n'est donnée. Le sud est placé en haut de la carte et le nord en bas. La route pour Rome est indiquée par de petits points distants les uns des autres d'un mille allemand (environ 7.400 m), permettant ainsi au voyageur de calculer la distance qu'il lui reste à parcourir. Etzlaub fournit également, sur le côté droit du cadre, la longueur des jours au solstice d'été aux latitudes correspondantes. C'est la première fois que ce genre de renseignements, très utiles aux voyageurs, est mentionné. Naturellement, de l'Allemagne à Rome, il faut traverser les Alpes. Trois passages existent. À l'ouest, le premier va de Coire (Chur), considérée comme la plus ancienne ville de la Confédération helvétique et chef-lieu du canton actuel des Grisons, à Côme en passant par le col du Splügen ou peut-être par celui du Septimer, alors très fréquenté. Il est curieux que le Saint-Gothard, bien connu et utilisé à l'époque, ne soit pas mentionné. Le second itinéraire passe par le col du Brenner et arrive jusqu'à Trieste et Vérone. Enfin, à l'est, un tracé va de Villach, dans le sud de l'Autriche, à Venise et Padoue par le col de Tarvis. Le Saint-Bernard est mentionné sur la carte, bien qu'aucun chemin n'y passe et sans que l'on sache s'il s'agit du petit ou du grand.

En 1501, Etzlaub fait paraître une autre carte-itinéraire plus grande, la *Carte des routes de l'Empire romain*. Elle s'étend de Viborg au Danemark jusqu'au sud de Salerne. En plus des itinéraires de la première carte, elle comprend un chemin de Saint-Jean de Maurienne à Turin par Avigliana, un autre qui, en prolongement du Splügen, va de Milan à Gênes et enfin un de Salzbourg à Villach. La région du Rhône et le Dauphiné sont particulièrement bien représentés. Entre le col du Mont-Cenis, la Tarentaise et Genève, le toponyme *sophoi*, en lettres capitales, fait sans doute référence à la Savoie.

Puis vient la *Carta itineraria Europae* de Martin Waldseemüller, un cartographe dont il sera largement question plus loin, dont la première édition, perdue, date de 1511. Sa seconde édition, de 1520, est la première

carte imprimée qui couvre toute l'Europe. Elle est très largement inspirée de celle d'Etzlaub, comme la carte de Georg Erlinger de 1524.

Les premières cartes

Les véritables cartes font leur apparition. Jacques Signot est chargé par Charles VIII de décrire les routes et les cols que l'armée peut emprunter pour pénétrer en Italie. En 1515, il publie une carte sur laquelle dix cols sont mentionnés. En 1524, Aegidius Tschudi (Glaris, 5 février 1505 - 28 février Glaris, 1572) est le premier à parcourir les Alpes suisses d'est en ouest. Il franchit les cols du Septimer, du Splügen, du Petit-Saint-Bernard, du Lukmanier, du Gothard, de la Furka, du Grimsel et du Grand-Saint-Bernard. Il atteint le glacier du Théodule, près de Zermatt. À l'époque, c'est une entreprise extraordinaire que de monter à une altitude de presque 3.000 m. Il publie, en 1538, son ouvrage *Alpisch Rhaetia*, accompagné d'une carte murale de la Suisse qui s'étend du lac de Genève à l'Engadine. Elle est centrée sur le Saint-Gothard, alors considéré comme le point culminant des Alpes. De nombreux toponymes, en latin, en allemand et en français, sont mentionnés et les cols et les vallées sont dessinés avec soin. C'est ce même auteur qui popularisera l'histoire de Guillaume Tell dans son *Chronicon Helveticum.* Dans sa *Cosmographie* de 1544, Sebastian Münster nomme le Mont Viso. En 1548, la *Chronique* de Johann Stumpf (Bruchsal, 1500 - Zürich, 1578), un historien, théologien et topographe suisse qui joua un rôle important lors de la Réforme, mentionne le Monte Giove (3.010 m), le Glarnisch (3.124 m) et le Bletschorn (3.953 m). Il faut dire que la situation politique ne facilitait pas la tâche des géographes. En effet, en 1524, Genève avait secoué le joug des ducs de Savoie et rompu les liens avec le Faucigny. Les géographes devaient donc puiser leurs informations à deux sources : la Savoie pour les vallées, les torrents et les bourgades, Genève pour le Mont-Blanc que l'on aperçoit depuis la ville. Voilà qui explique pourquoi le Mont-Blanc eut tant de mal à être placé au sud de la vallée de Chamonix.

La première carte de la Savoie est datée de 1556 et est publiée à Anvers. Elle est due au cartographe belge Gilles Boileau de Bouillon (1525 - 1563). Elle indique la route pour aller de Lyon en Italie, confirmant ainsi les relations commerciales entre les villes situées de part et d'autre des Alpes. Il est fait mention de Chambéry, Saint-Jean de Maurienne et Lanslebourg en Savoie et de Ferriere, Susa, San Ambrogio et

surtout Avigliana, un nœud important sur la route du Mont-Cenis et sur celle du Mont-Genèvre, en Italie. Le massif du Mont-Blanc ne se distingue pas de l'ensemble. Les lacs Léman, d'Annecy et du Bourget sont très sommairement dessinés mais assez bien positionnés. Sur de nombreuses cartes de cette époque ou ultérieures, on observe que Milan, Gênes et Turin communiquent avec la Savoie par le col du Mont-Cenis. Les échanges commerciaux avec le sud de la France s'effectuent par le col du Mont-Genèvre. Mais toujours aucune mention du Mont-Blanc. Deux explications à cette absence sont avancées : l'illusion d'optique qui fait croire que d'autres sommets des Alpes, comme le massif du Mont-Cenis, sont plus élevés et le fait que les liens entre le Fauciny et Genève soient rompus depuis le début du XVIe siècle quand cette ville s'est libérée de la tutelle des ducs de Savoie. De plus, la vallée de Chamonix n'est pas d'un accès facile, d'un côté (Sallanches) comme de l'autre (Martigny), et le Mont-Blanc n'offre pas une forme spectaculaire comme l'Eiger, la Jungfrau ou encore le Cervin.

La première carte à faire spécifiquement mention du Mont-Blanc, nommé « La Mont(.agne) Maudite », dénomination qu'il gardera jusqu'au XVIIIe siècle, date de 1606 ; c'est la *Chrorografica tabula lacus Lemani locorumque circumjacentium* de Jacques Goulart, un pasteur épris de géographie. Le Mont-Blanc est situé au nord-est de Bonneville et orienté tel qu'on le voit depuis Genève. En 1656, la *Carte du Daufiné et des pays circomvoisins* de Nicolas Sanson d'Abbeville (Abbeville, 20 décembre 1600 - Paris, 7 juillet 1667) fait mention de « Cormoyeu » sur le versant valdôtain et indique « Les Glacières » à l'ouest, le « Col Major » au centre et le « M. Malay » au nord-est. L'Arve prend sa source au sommet du triangle formé par ces trois toponymes. Le « Col Major », hypothétique passage entre Chamonix et Courmayeur, sera mentionné dans divers récits de voyage et subsistera sur de nombreuses cartes, même jusqu'au XIXe siècle.

Longtemps, les cartes des Alpes restent imprécises et les massifs mal représentés. Il faut attendre la publication en 1680 de la carte de Giovanni Tomaso Borgonio (1620 - 1683), ingénieur-militaire et cartographe savoyard qui avait débuté sa carrière comme secrétaire et valet de chambre du duc de Savoie Charles-Emmanuel II et maître aux écritures du prince Victor-Amédée II. C'est une carte murale de grande dimension, composée de quinze feuilles où l'estompage et l'ombrage sont utilisés pour rendre le relief de manière suggestive. Elle eut un succès considérable et était encore rééditée presque cent ans plus tard. De par

la précision de la représentation des routes et des cols, elle peut être considérée comme la première véritable carte militaire. Cependant, les relevés sur le terrain ayant été effectués pendant une période d'extension des glaciers (le « petit Âge glaciaire », entre 1580 et 1643 environ), ceux-ci sont souvent trop étendus.

On observe le Mont-Blanc de loin, mais on ne s'y aventure pas. Le mathématicien genevois Nicolas Fatio de Duillier (Duillier, 26 février 1664 - Worcester, 12 mai 1753) est un ami de Newton. Avec son frère Jean-Christophe (1656 - 1720), qui en dressera un croquis tout à fait fidèle, il entreprend en 1685 de mesurer le Mont-Blanc depuis les environs de son domicile et obtient 4.728 m. C'est un beau résultat, fruit de deux erreurs qui se compensent : il avait surestimé l'altitude du lac Léman et sous-estimé celle du Mont-Blanc par rapport au lac. Il conclut

> *Cela me fait croire que de toutes les montagnes qui ont jusqu'à présent été mesurées avec quelqu'exactitude, il n'y en a point de plus haute que la Montagne maudite.*

On croyait alors que la plus haute montagne du monde était le Pic du Teide (3.717 m), dans l'île de Ténérife aux Canaries, car sa pyramide enneigée se voyait de fort loin. Le navigateur Alvise Cadamosto (Venise, ca. 1432 - Venise, 18 juillet 1488), chargé par le prince Henri le Navigateur d'explorer les côtes de l'Afrique, lui attribuait, en 1455, une altitude de près de 100 km !

La conquête des sommets

Longtemps, le massif du Mont-Blanc nourrit les craintes des habitants de la vallée. Seuls les cristalliers et les chasseurs de chamois s'y aventurent. Dans son *Itinera Alpina tria* de 1708, le médecin et naturaliste suisse Johann Jacob Scheuchzer (Zürich, 2 août 1672 - Zürich, 23 juin 1733) indique que le massif est un univers terrifiant avec des précipices, des avalanches, des dragons cracheurs de feu et des habitants sauvages. Des esprits hantent les sommets pour empêcher les hommes d'y passer la nuit. D'autres légendes font état de fées qui peuplent les hauteurs. On ne sait pas alors si l'on peut survivre à des telles altitudes. En 1690, l'évêque d'Annecy, Jean d'Arenthon d'Alex (Alex, 1620 - Abbaye d'Abondance, 4 juillet 1695), vient spécialement exorciser les montagnes de glace de Chamonix. Cependant, le Mont-Blanc fascine, même si l'on est conscient qu'il présente des dangers, mais d'une autre nature. Les

relations de voyages et les descriptions fleurissent comme celle de Scheuchzer et celle du médecin, poète et naturaliste suisse Albrecht Haller (Berne, 16 octobre 1708 - Berne, 12 décembre 1777), dix ans plus tard. Les Alpes sont à la mode. Jean-Jacques Rousseau (Genève, 28 juin 1712 - Ermenonville, 2 juillet 1778), élevé entre Annecy et Chambéry (aux célèbres *Charmettes*), est l'un de leurs chantres dans *Julie ou la Nouvelle Héloïse*. Mais ce sont surtout des Anglais, William Windham (1717 - 30 octobre 1761) et Richard Pococke (Southampton, 19 novembre 1704 - Charleville Castle, Irlande, 25 septembre 1765), venus faire leurs études à Genève en 1741, qui font connaître la vallée à l'extérieur. Conduits au Montenvers par les habitants, ils découvrent la mer de Glace et s'y risquent. Leur *Relation d'un voyage aux Glacières* fait naître la curiosité des milieux littéraires et scientifiques de Genève et de Londres. Ils évoquent un col entre Chamonix et Courmayeur

> *Les guides nous racontèrent qu'à l'époque de leurs pères, le glacier était très réduit et qu'il y avait aussi, le long de ces vallées, un passage qui permettait de rejoindre le val d'Aoste en six heures. Le glacier s'était ensuite tellement étendu que ce passage était désormais fermé et le glacier progressait d'année en année.*

Windham suggérait que des *baromètres pour juger de la hauteur des montagnes seraient fort utiles, s'il y avait des mathématiciens dans la compagnie*. Un an après, Pierre Guillaume Martel (ca. 1701 - 1761), un fabricant genevois d'instruments scientifiques (en particulier, d'une alidade), s'y rend aussi et donne son nom actuel à la montagne sur un croquis qui accompagne son *An account of the Glacieres or Ice Alps in Savoy*, publié à Londres en 1744. Mais il est plus frappé par la forme spectaculaire des Drus que par le Mont-Blanc. Il affirme que le ≪ Col Major ≫, qui y est représenté comme une vallée glacière, n'est plus praticable à cause de *l'effondrement de blocs de montagne*. On sait en effet qu'un énorme éboulement s'était produit en 1717 dans la région du glacier du Triolet. D'autres voyageurs apparaissent dans la vallée comme, en 1762, un ami de Saussure, Louis-Alexandre de La Rochefoucauld, duc d'Enville, puis duc de la Rouchefoucauld, né à Paris le 4 juillet 1743 et exécuté à Gisors le 4 septembre 1792 par les volontaires de la Sarthe et de l'Orne qui mènent la chasse aux aristocrates. En 1765, madame Couteran, la veuve d'un notaire, ouvre la première auberge. Saussure y séjournera plus tard. D'autres suivront bientôt. En 1775, sir George Augustus William Shuckburgh-Evelyn (23 août 1751 - 11 août

1804), politicien anglais, mathématicien et astronome, estime l'altitude du Mont-Blanc à 4.779 m. Il est alors considéré comme le *plus haut mont de l'Europe et probablement de l'ancien monde* et apparaît pour la première fois sur une véritable carte géographique, celle de la Suisse du britannique William Faden (1750 ? - 1836), en 1778.

Horace-Bénédict de Saussure naît à Conches, près de Genève, le 17 février 1740. Il appartient à une famille patricienne influente. En 1750, la famille va s'installer à Frontenex à deux kilomètres de Genève sur la route de Thonon. Le jeune Horace-Bénédict va y vivre jusqu'à son mariage à l'âge de vingt-cinq ans. Dès dix-huit ans, il se prend de passion pour la montagne

> *J'ai eu pour la montagne, dès l'enfance, la passion la plus décidée ; je me rappelle encore le saisissement que j'éprouvai la première fois que mes mains touchèrent le rocher du Salève, et que mes yeux jouirent de ses points de vue.*

Il part herboriser lors de longues promenades solitaires. Comme tous les fils de bonne famille, il est formé à diverses disciplines. En 1759, il présente une thèse sur l'origine de la chaleur terrestre à l'Académie de Genève, puis reprend ses excursions. En 1760, le médecin et naturaliste Albrecht de Haller (Berne, 16 octobre 1708 - Berne, 12 décembre 1777) l'envoie à Chamonix pour récolter des plantes. Le 24 juillet, Saussure monte au Brévent, accompagné de son inséparable baromètre. Coup de foudre. Il est sans doute le premier à envisager l'escalade du Mont-Blanc. Il obtient une chaire de philosophie à vingt-deux ans mais, dès qu'il le peut, il revient à son cher *Chamouni.* Il se marie et commence un tour des capitales européennes. Il entreprend plusieurs reconnaissances dans les Alpes et y effectue des mesures. Il a une idée à peu près exacte de l'attitude du Mont-Blanc.

Au début des années 1770, Saussure fait placarder des affiches offrant une récompense au premier qui gravira le fameux sommet ou trouvera une voie praticable pour y parvenir et dédommageant même ceux qui feront des tentatives infructueuses. Mais les candidats ne se bousculent pas. Accompagné de son guide, Pierre Simon, il sillonne le massif : Brévent, col de Balme, mer de Glace, cirque du Talèfre, grotte de l'Arveyron. Trois fois, il va faire le tour du Mont-Blanc. On utilise encore son itinéraire de nos jours. Avec Jean-Laurent Jordanay, dit Patience (ca. 1740 - 1825), il explore le glacier de Miage et monte au Crammont pour mesurer la hauteur de la montagne. En 1770, les frères Deluc, des amis

de Rousseau, réussissent la première ascension du Buet. En 1775, Thomas Blaikie (Corstorphine, près d'Édimbourg, 1750 ou 1758 - Paris, 19 juillet 1838), un paysagiste et botaniste écossais, vient herboriser dans la vallée et faire des excursions. Il emmène avec lui, le futur docteur Michel-Gabriel Paccard (Chamonix, 1757 - Chamonix, 1827). Ils vont jusqu'aux rochers de l'aiguille du Goûter mais Paccard est fatigué. Toujours en 1775, la première tentative sérieuse a lieu. Quatre chamoniards, Victor Tassai, le fils Couteran, Michel et François Paccard, deux cousins du futur docteur, atteignent les Grands Mulets, couchent au pied du glacier de Taconnaz et parviennent au sommet de la Montagne de la Côte qui sépare le glacier des Bossons de celui de Taconnaz. Mais Jean-Nicolas Couteran tombe en voulant passer une crevasse.

L'année 1783, voit l'entrée en scène d'un personnage attachant par son amour de la montagne, mais souvent antipathique par ses attitudes et finalement assez peu doué, Marc-Théodore Bourrit (6 août 1739 - Genève, 7 octobre 1819), un ancien chantre de la cathédrale de Genève. Il se met sur les rangs mais échoue. Le Mont-Blanc devient son obsession mais il ne s'avouera jamais vaincu et, au cours des années, son acharnement inspirera une admiration mêlée de pitié. L'un des membres de sa première expédition est le docteur Michel-Gabriel Paccard qui, l'année suivante, parvient d'abord jusqu'au glacier du Tacul et, une autre fois, au pied du dôme du Goûter. Une autre tentative infructueuse réunit Jean-Marie Couttet, dit Moutelet, Joseph Carrier et Jean-Baptiste Lombard, dit le Grand Jorasse, qui pense le sommet inaccessible. Pendant ce temps, Saussure ne reste pas inactif. Il assure ses cours à l'Académie, remplit les obligations politiques que sa position sociale lui impose et, de temps en temps, effectue des tournées dans les Alpes dont il veut comprendre la structure, le processus de formation et les phénomènes atmosphériques. Il se constitue aussi des collections et gravit plusieurs sommets et points panoramiques. En septembre 1784, deux des guides de Bourrit atteignent, sans lui, les rochers en dessous des Bosses, là où se trouve maintenant l'observatoire Vallot. On est à 4.365 m, il en reste encore 442 à franchir. L'obstacle reste l'arête sommitale. En septembre 1785, Saussure, accompagné de Bourrit, tente sa chance une nouvelle fois. Échec.

Les tentatives reprennent en juin 1786. Joseph Carrier, Jean-Michel Tournier et François Paccard vont coucher à la Montagne de la Côte. Sans y avoir été invité, un jeune cristallier et chasseur de chamois, Jacques Balmat (Vallée de Chamonix, 1762 - Vallée de Sixt, 1834), se

joint au groupe. À la descente, il s'éloigne un peu des autres pour rechercher des cristaux. On ne l'attend pas, la nuit arrive et il la passe dans la neige. Il profite du matin pour trouver, selon lui, la meilleure voie vers le sommet, quelques 939 mètres au-dessus de lui. Mais, de retour dans la vallée, il garde sa découverte pour lui et cherche à la vendre au plus offrant, Saussure ou Bourrit. Mais il s'adresse finalement au docteur Paccard. Après trois semaines d'attente, le ciel semble favorable. Pour ne pas éveiller les soupçons, les deux hommes partent chacun de leur côté. Ils bivouaquent en haut de la Montagne de la Côte et, le 8 août 1786 à 18h25, il atteignent le sommet du Mont-Blanc. Le baron Adolf Traugott von Gersdorf (1744 - 1807) les avait suivis à la lorgnette depuis midi.

Le père de Paccard, un notaire royal, lui demande un témoignage écrit le soir même. Il annonce la publication de son récit sans mentionner le nom de Balmat ce qui est regrettable. Ce dernier reçoit la gratification promise par Saussure, son salaire du guide (un écu) et un don du roi de Sardaigne qui, en plus, l'autorise à signer désormais ≪ Jacques Balmat, dit Mont-Blanc ≫. Rapidement, les journaux relatent la conquête ce qui fait naître une controverse entre les deux vainqueurs : lequel a découvert la voie d'accès, lequel est parvenu le premier au sommet ? Le 18 (ou le 21) août, Saussure fait une dernière tentative, le temps est incertain et c'est un échec. Il charge Balmat de procéder à des reconnaissances et de le prévenir dès que le temps sera clément. Bourrit, jaloux, va dresser l'un contre l'autre les deux vainqueurs. Il fera en sorte que le récit de Paccard ne soit jamais édité et publiera lui-même un récit où il vantera Balmat et diffamera le docteur. Saussure, un peu dépité de ne pas avoir réussi, reste muet et ne cherche ni à faire rétablir la vérité, ni à pousser la publication de Paccard. Il aurait préféré que Balmat et ses guides réussissent seuls et il admet moins facilement la victoire du docteur. Bien entendu Balmat conservera et développera même ses qualités de montagnard, mais il s'évertuera à ressembler au mauvais portrait que Bourrit avait tracé de lui et il renouvellera plus tard à Alexandre Dumas le faux récit de celui-ci. Plusieurs fois Paccard rétablira la vérité et cette lamentable querelle entre deux hommes que tout aurait du rapprocher (mais nous étions au XVIIIe siècle et ils n'étaient pas de la même condition sociale) se terminera par un certificat, signé devant témoins, attestant que Balmat avait reçu son dû.

Après la conquête, un an passe. Le 28 juin 1787, Balmat écrit à Saussure qu'il a tenté une nouvelle ascension et que seul le vent l'a

empêché d'arriver au sommet. Saussure quitte Genève et arrive à Chamonix le 9 juillet. Mais, le 5 juillet 1787, Balmat, accompagné des guides Jean-Michel Cachat, dit le Géant, et Alexis Tournier, réussit la seconde ascension par une autre voie. Pendant trois semaines, il pleut. Le 1er août, le temps se lève et la caravane de Saussure peut s'ébranler. C'est une véritable expédition. Il est accompagné de son valet de chambre, surnommé Têtu, et de dix-huit guides dont Cachat, Tournier, Ravenet, Jean-Michel Devouassoux, Pierre Balmat, Jean-Pierre Cachat, dit Cachat des Prés, Jean-Baptiste Lombard, Pierre-François Favet et François et Jean-Marie Couttet. Ils emportent un matériel scientifique impressionnant, mais également, entre autres choses, du vin blanc, de l'eau de vie, une tente, un lit, son matelas et des couvertures, deux redingotes vertes, un habit blanc, des serviettes, un rideau vert, des guêtres et... des pantoufles. On dirait un inventaire à la Prévert ! Tout Chamonix suit l'ascension avec des télescopes. L'expédition passe une première nuit à la Montagne de la Côte, puis aborde les glaciers. Second bivouac près du dôme du Goûter (4.304 m). Enfin, le 3 août à 11h05, Saussure réalise son rêve vieux de vingt-sept ans. Il reste sur la cime jusqu'à 15h30 et effectue de nombreuses mesures. Le lendemain, après un bivouac, il est de retour à Chamonix où il est fêté par tous.

Saussure est un savant, ne l'oublions pas. Lors de son ascension du Mont-Blanc, il a emporté avec lui plusieurs baromètres, quatre hygromètres, deux boîtes à mercure, trois électromètres, deux boussoles, une toise, un cercle vertical, un goniomètre, une alidade, un sextant, un niveau et même une table de logarithmes. Pendant l'ascension, il se livre à de nombreuses mesures d'angles et de distances et calcule les triangles correspondants. Il évalue périodiquement son altitude grâce à un baromètre spécialement conçu pour servir d'altimètre et il peut ainsi vérifier les résultats obtenus par mesures angulaires. L'intérêt suscité par la première ascension est complètement effacé par la réussite de Saussure. Toute la presse internationale en parle. L'exploit relègue au second plan l'ascension du docteur Paccard qui en prend ombrage. Des excès regrettables suivront de part et d'autre. En 1786, Saussure publie, avec Marc Auguste Pictet (Genève, 23 juillet 1752 - Genève, 19 avril 1825), la première carte du massif du Mont-Blanc. Ce sera le même Pictet qui, en 1820, fera connaître à Arago la fameuse expérience d'Œrsted de déviation d'une aiguille aimantée par un courant électrique. Arago refera cette expérience devant l'Académie des sciences à son retour de Genève. André-Marie Ampère (Lyon, 20 janvier 1775 - Marseille, le 10

juin 1836) se passionnera pour cette expérience et, en trois semaines, bâtira l'électromagnétisme. Avec les *Voyages dans les Alpes* de Saussure, publiés entre 1779 et 1796, et les ouvrages de Bourrit, la vallée de Chamonix et le massif du Mont-Blanc acquièrent leur réputation touristique et deviennent à la mode. Saussure s'éteint à Genève le 22 janvier 1799. On retrouve Bourrit, âgé de plus de soixante-dix ans, à Chamonix en 1812. Il en revient paralysé des deux jambes. Le malheureux vieillard loue alors une maison de campagne, non loin de Genève, sur la colline et passe les dernières années de sa vie assis près d'une fenêtre d'où il peut contempler le lac et le Mont-Blanc. Il s'éteint le 7 octobre 1819.

(voir Biblio : de Saussure, Durier, Joutard, Modica, Rébuffat).

Après 1800

Pendant la première campagne d'Italie, Bonaparte ne dispose pas de cartes fiables. Après le traité de Campoformio (octobre 1797), la République cisalpine est fondée. Il faut l'administrer. Aussi Bonaparte demande-t-il à Bacler d'Albe de réaliser une *Carte générale du théâtre de la guerre en Italie*. Mais le devis est refusé et la carte est lancée par souscription publique. Les travaux préparatoires sont terminés en 1799. Les troupes austro-russes, profitant de l'absence de Bonaparte alors en Égypte, harcellent les armées françaises qui doivent se retirer de Milan. Mais, dans la vallée d'Aoste, les vingt matrices de cuivre déjà réalisées et le matériel d'exécution sont saisis par les insurgés qui les remettent aux Autrichiens. Lors de la seconde campagne d'Italie, Bonaparte ne dispose donc toujours pas de cartes précises. Cependant, il passe le Grand-Saint-Bernard avec son armée (15-20 mai 1800) et bat les Autrichiens à Marengo (14 juin). Les cuivres gravés à Milan seront retrouvés plus tard. Sous l'Empire, une carte complète des Alpes françaises et de l'Italie du Nord est dressée par l'ingénieur géographe Jean-Baptiste Raymond, l'aîné, en 1820. Elle comprend 12 feuilles au 1/200.000e. Quand on la compare à celle de Bacler d'Albe, on réalise l'amélioration apportée par les instructions de la Commission de 1802. La montagne est représentée en lumière oblique, avec de courtes hachures limitées par des courbes. Cependant, il n'y a toujours pas de cotes.

Les Alpes attirent de plus en plus de touristes, la plupart venus de Grande-Bretagne où la littérature alpine est bien diffusée. Au milieu du XIXe siècle, poussés par la demande, des guides touristiques et des

cartes géographiques voient le jour. Ce n'est qu'alors que les glaciers sont correctement cartographiés. C'est à cette époque qu'a lieu leur dernière expansion comme on peut le voir en comparant les différentes sources que l'on possède. James David Forbes (Édimbourg, 20 avril 1809 - Édimbourg, 31 décembre 1868) est un physicien écossais principalement connu pour ses travaux sur la conduction de la chaleur. Par ses études sur l'écoulement visqueux des glaciers, qui avancent plus rapidement au centre qu'aux bords, on peut le considérer comme le premier glaciologue. Au cours de l'été 1842, il effectue des reconnaissances dans la vallée de Chamonix. L'année suivante, il publie *Travels through the Alps of Savoy and other parts of the Pennine chain, with observations on the phenomena of glaciers* qui contient une carte de la mer de Glace au 1/25.000e. Mais le massif reste mal connu en dehors des trois itinéraires d'accession au sommet du Mont-Blanc. C'est Forbes encore qui, en traversant la chaîne depuis le col de Balme en 1850, fait mieux connaître sa partie orientale et pose le problème de sa définition. En 1862, l'alpiniste et cartographe irlandais Anthony Miles William Adams-Reilly (11 février 1836 - Dublin, 15 avril 1885) arrive à la conclusion qu'il est impossible de concilier les cartes de la Suisse et celles du Piémont. Aussi, entreprend-il de nouvelles mesures qui, en sept semaines, aboutissent à une synthèse. Selon son propre aveu, il avait obtenu des informations capitales du capitaine français Jean-Joseph Mieulet (né le 27 janvier 1830 dans le Tarn-et-Garonne).

La création des départements oblige à de nouvelles cartes. Selon qu'elles sont françaises ou italiennes, la frontière entre les deux pays ne passe pas exactement au même endroit. L'existence d'une frontière à travers le massif remonte à la cession de la Savoie à la France en 1860 et est régie par le traité de Turin. Une carte, imprécise, jointe au traité fait passer la frontière au sommet. La partie centrale du massif du Mont-Blanc est cartographiée par le capitaine Jean-Joseph Mieulet en vue de l'établissement de la carte d'État-Major. Les données sont tellement imprécises qu'il doit se confectionner lui-même un canevas avant de commencer le levé du terrain. Les points de troisième ordre de la triangulation n'avaient pas été mesurés, mais seulement obtenus par recoupements. Ils comportaient des erreurs tant sur les positions que sur les altitudes. Entre le 16 juin et le 28 septembre 1863, Mieulet prend des mesures dans presqu'une centaine de stations et parvient au sommet le 14 juillet. Il donne l'altitude de trente-trois points, dont celle du Mont-Blanc à 4.809,90 m. Sa carte fait apparaître le triangle de

terres françaises qui figure jusqu'à aujourd'hui sur les cartes éditées en France alors que les cartes italiennes, notamment l'Atlas sarde de 1869, font état d'un tracé passant par le sommet. Bien entendu, une carte au 1/80.000e ne peut contenter des alpinistes car il est irréalisable d'y faire figurer tous les détails qui les intéressent. Par exemple, les deux pointes des Drus ne sont distantes que de 105 m, ce qui ne représente que 1,25 mm sur la carte, celles de l'aiguille du Géant le sont de 25 m, ce qui correspond à un quart de millimètre (voir Biblio : P. Girardin). Il n'est naturellement pas possible de citer toutes les cartes de cette région qui ont été dressées. Signalons cependant la très belle carte du massif due à l'architecte Eugène Viollet-Le-Duc (Paris, 27 janvier 1814 - Lausanne, 17 septembre 1879), publiée en 1876. Le dessin en est très soigné et le relief est représenté comme s'il était éclairé par les rayons du Soleil à dix heures du matin.

À partir de 1892, Henri Guillaume Marie Vallot (Paris, 14 mai 1853 - 1922), ingénieur des Arts et manufactures, commence, avec l'aide de son cousin Henri Marie Joseph Vallot (Lodève, 16 février 1854 - Nice, 12 avril 1925), à établir la carte au 1/20.000e du massif du Mont-Blanc. La triangulation comprend 610 points et couvre 530 km^2 (dont 149 levés pas à pas). Elle est directement rattachée aux points du premier et second ordre de la triangulation du Dépôt de la guerre. La base, longue de 1.735 m est mesurée dans la vallée de l'Arve. En altitude, Joseph Vallot fait appel à la photographie (5.500 clichés 13 $\times$ 18 sont pris), mais, pour les sites qui ne peuvent être photographiés ou qui exigent une grande précision, Henri Vallot a recours à la planchette. Cet énorme travail ne sera achevé qu'après la mort des deux cousins par Charles Vallot, le fils de Joseph. C'est lui qui lancera en 1925 la fameuse collection des Guides Vallot.

Nous avons vu le Service géographique de l'armée, avec Cholesky dans ses rangs, effectuer des levés dans les Alpes. À côté des grandes institutions et des corps spéciaux, il faut signaler le travail d'un amateur, Paul Helbronner (Compiègne, 24 avril 1871 - 18 octobre 1938), polytechnicien, officier d'artillerie et montagnard, qui, encouragé par Henri Vallot, refait seul et sans aucun appui officiel toute la triangulation des Alpes françaises de 1903 à 1928. En 23 saisons, il établit 1.097 stations de moins de 2.000 m, 570 entre 2.000 et 3.000 m et 151 au-dessus de 3.000 m. Il réussit également le rattachement géodésique de la Corse à la Provence (280 km) à l'aide de signaux optiques. Entre 1910 et 1939, il fait paraître ses douze volumes *Description géométrique des Alpes françaises*. On lui

doit de très belles photographies et des aquarelles des Alpes conservées au Musée dauphinois de Grenoble. La pointe Helbronner (3.462 m), dans le massif du Mont-Blanc, lui rend hommage.

Des campagnes de mesure de l'altitude du Mont-Blanc ont lieu régulièrement. En 2005, elle était de 4.808,75 m. Les 15 et 16 septembre 2007, on obtint 4.810,90 m. Le résultat de la dernière campagne, qui s'est achevée à la mi-septembre 2009, donne 4.810,45 m, soit 45 cm de moins.

Un continent : l'Amérique

La découverte de l'Amérique constitue un chapitre capital de l'histoire de l'humanité. Nous allons la relater brièvement ici en insistant surtout sur l'origine de sa dénomination et sur la cartographie.

Quel est le contexte historique qui a conduit à cette découverte ? Empruntons le tableau à Stefan Zweig (Vienne, 28 novembre 1881 - Pétropolis, Brésil, 23 février 1942).

An 1000. L'Occident est endormi. Plus de sciences, plus de découvertes. Le Monde attend sa fin prochaine, il a trop péché et Dieu l'a condamné. An 1100. La fin ne s'est pas produite. Dieu a été clément. On le remercie en bâtissant églises et cathédrales. On part délivrer le Saint-Sépulcre. An 1200. Les croisades ont ouvert les yeux des hommes. D'autres pays s'offrent à eux. D'autres cultures, souvent très raffinées, existent. Il faut découvrir le Monde. Les premières universités voient le jour. An 1300. Le carcan est brisé. Tout renaît. Marco Polo revient de Chine. Il en rapporte des soieries et des épices. Il faut parcourir le Monde, atteindre les Indes. An 1400. Le prince Henri le Navigateur rassemble géographes, astronomes et marins autour de lui. Les grandes découvertes vont pouvoir commencer. 1419, (re)découverte de Madère. 1445, le cap Vert est contourné. Puis c'est Bartolomeu Dias de Novais (Algarve, ca. 1450 - au large du cap de Bonne-Espérance, 29 mai 1500) qui franchit le cap de Bonne-Espérance en janvier 1488.

Et si on allait vers l'ouest ?

Les découvertes

Il fallait découvrir une route maritime, plus courte que la voie terrestre, pour atteindre les Indes. Après de longues négociations, Christophe Colomb (Gênes, 1451 - Valladolid, 20 mai 1506) arrive à convaincre

les Rois catholiques de lui confier le commandement d'une flottille composée de deux caravelles, la *Pinta* et la *Niña*, et d'une nef, la *Santa Maria*. Le 3 août 1492, c'est le départ de Palos de la Frontera. Après une escale à Las Palmas de Gran Canaria du 9 août au 6 septembre, on reprend la mer plein ouest en conservant la latitude des Canaries que Colomb croyait être celle de Cipangu (le Japon). Le 16 septembre, apercevant des masses d'herbe qui voguent, on se croit près de la terre ferme. Il s'agit en fait de la mer des Sargasses, située à environ 1.600 kilomètres des côtes. À partir du 19 septembre, les vents faiblissent fortement. Les navires restent immobilisés et l'inquiétude s'installe au sein de l'équipage. Le 25 septembre, Martín Alonso Pinzón (Palos de la Frontera, ca. 1441 - Palos de la Frontera, 31 mars 1493), le capitaine de la *Pinta*, croit voir une terre, mais ce n'est qu'une illusion d'optique. Le vent se lève à nouveau, mais les jours passent sans qu'aucune terre n'apparaisse. Colomb pense avoir dépassé l'Inde. Le 7 octobre, le frère de Pinzón, Vicente Yáñez (Palos de la Frontera, ca. 1461 - Séville, 1514), qui commande la *Niña* est également victime d'une illusion d'optique. Colomb décide d'observer les oiseaux et met le cap vers l'ouest-sud-ouest. Le 10 octobre, toujours rien. Les marins se croient perdus. Les vivres et l'eau douce commencent à manquer. Le 12 octobre 1492, à deux heures du matin, Rodrigo de Triana (de son vrai nom Juan Rodríguez Bermejo ?), un marin de la *Pinta* né en 1469 à Séville, annonce que la terre est en vue. On attend le lever du jour pour accoster.

Dans la matinée, Colomb et les frères Pinzón prennent place dans une barque. Le navigateur croit avoir atteint Cipangu. Il fait enregistrer par le notaire qui les accompagne la prise de possession de l'île pour le compte du roi d'Espagne et la baptise San Salvador (Guanahani pour les indiens Taïnos). Il s'en fait nommer vice-roi et gouverneur général. On reprend la mer et, le 28 octobre, Colomb aborde sur une autre île qu'il nomme Juana en l'honneur de Jeanne, la fille des Rois catholiques ; il s'agit de Cuba, mais il se croit à Mangi en Chine et pense, qu'après seulement quelques jours de voyage, il peut atteindre le Gange. Le 6 décembre, Saint-Domingue est découverte. Christophe Colomb met le cap sur l'Espagne le 16 janvier 1493 et, le 4 mars, il arrive dans l'estuaire du Tage. On pense que la route des Indes vers l'ouest a été trouvée.

En fait, Colomb avait sous-estimé la distance à parcourir pour atteindre les Indes ou Cipangu par l'ouest. On croyait alors que l'Eurasie s'étendait sur 225°. Il ne restait donc que 135° à couvrir pour atteindre Cipangu par l'ouest. Sur la carte de Paolo dal Pozzo Toscanelli (Florence,

1397 - Florence, 10 mai 1482) de 1474 dont Christophe Colomb se servit lors de son premier voyage, l'Europe et l'Asie ne sont même séparées que par 120°. En fait, l'Eurasie n'embrasse que 185° et le Japon se situe donc à 175° à l'ouest des Canaries. De plus, Colomb avait pris comme mesure d'un degré de longitude la plus basse des estimations, soit 45 milles nautiques alors qu'il en vaut 60. Ainsi, Cipangu n'était qu'à 6.075 milles des Canaries (ou à 5400 si l'on se base sur 120°) au lieu de 10.500, c'est-à-dire 11.250 km (ou 10.000) au lieu de 19.500 ! S'il avait su devoir affronter 8.250 km (ou 9.500) de plus, peut-être Colomb ne se serait-il pas engagé dans l'aventure, à moins qu'il n'ait cherché à tromper sciemment les souverains espagnols afin qu'ils financent plus sûrement son expédition.

C'est le 10 mai 1497 qu'appareille de Cadix l'escadre conduite par Juan Dies de Solis (Lebrija, près de Séville, 1470 Zone du Río de la Plata, 1516) et Vincente Yáñez Pinzón, qui commandait la Niña lors du premier voyage de Colomb. À bord de l'un des navires, se trouve un certain Amérigo Mateo Vespucci (Florence, 9 mai 1452 - Séville, 22 février 1512). C'est le troisième fils du notaire florentin Cernastasio Vespucci. Il avait reçu une éducation classique et acquis quelques connaissances en mathématiques et en astronomie auprès de son oncle Giorgio Vespucci, un moine dominicain. Il était employé dans la banque florentine de Lorenzo di Pier Francesco di Medici (Florence, 4 août 1463 - Florence, 20 mai 1503), cousin et rival de Laurent le Magnifique (Florence, 1er janvier 1449 - Florence, 9 avril 1492). Mais un employé du comptoir de la banque à Séville semblait avoir commis des irrégularités et, le 14 mai 1491, on envoya Vespucci effectuer un contrôle dans cette succursale dirigée par un certain Juanoto Beraldi. Celui-ci, sentant sa mort approcher, nomma Vespucci son exécuteur testamentaire en 1495. On ne sait pas ce qu'Amérigo fit entre cette date et son embarquement deux ans plus tard à bord des navires de Solis et Pinzón.

Après une escale de huit jours aux Canaries, on s'élance vers l'ouest le 24 mai. Le 1er juillet, la côte du Honduras est atteinte et le premier cap est baptisé Gracias de Dios. Vespucci juge que cette terre est un continent et non une île. C'est là son premier titre de gloire. Puis on suit le littoral atlantique. Dans le golfe de Maracaibo, on rencontre une cité lacustre avec des maisons sur pilotis qui évoquent Venise, ce sera le Vénézuela (Petite Venise, Venezziola en italien). On longe ensuite le Mexique, la Louisiane et la Floride jusqu'à un port naturel situé entre le cap Kennedy et la baie de la Chesapeake. Le 15 octobre 1498,

c'est le retour à Cadix. Vespucci effectuera quatre voyages vers ces nouvelles terres. Il descendra jusqu'à 52° de latitude sud, où il apercevra les Malouines (îles Faukland). Il relatera ses expéditions grâce à ses journaux de bord minutieusement tenus. Le récit du premier voyage sera adressé à son protecteur, Lorenzo di Pier Francesco di Medici, à l'automne 1502. Ces six feuillets furent traduits en latin par Fra Giovanni Giocondo (Vérone, ca. 1433 - Rome, 1er juillet 1515), un humaniste, archéologue et architecte, et on en recensera quatorze éditions. Le titre en était *Mundus Novus.* Avoir reconnu qu'il s'agissait d'une terre nouvelle, d'un nouveau monde, et non du Japon, des Indes ou de la Chine, et avoir été le premier à l'annoncer est son second titre de gloire. Il écrit, après avoir qualifié cette terre de nouvelle,

> *Car aucun de nos prédécesseurs ne savait rien de ces territoires que nous voyons, ni de ce qu'ils contiennent ; nos connaissances vont bien au-delà des leurs. La plupart d'entre eux croyaient qu'il ne se trouvait plus de terre ferme au sud de l'équateur, mais seulement une mer sans fin à laquelle ils donnaient le nom d'Atlantique, et même ceux qui estimaient possible l'existence d'un continent dans cette zone pensaient, pour différentes raisons, qu'il devait être inhabitable. Mon voyage a désormais prouvé que cette opinion est erronée, et même exactement contraire à la réalité, puisque j'ai trouvé au sud de l'équateur un continent où nombre de vallées sont peuplées de beaucoup plus d'hommes et de bêtes que notre Europe, l'Asie ou l'Afrique, et qui possède de surcroît un climat plus agréable et plus doux que les autres parties du Globe connues de nous.*

Vespucci fera le récit complet de ses quatre voyages dans une lettre du 4 septembre 1504 adressée à Pierro di Tommaso Soderini (Florence, 18 mai 1450 - Rome, 13 juin 1513), gonfalonier à vie de la République de Florence qui avait été instituée quelques années auparavant après la destitution de Pierre II de Médicis, le fils cadet de Laurent, et l'exécution de Savonarole. Les textes de Vespucci sont rapidement traduits en latin, en français et dans d'autres langues, et commencent à circuler dans toute l'Europe lettrée. Ils rencontrent un énorme succès. Vespucci est le premier navigateur à raconter, de façon à la fois instructive, vivante, colorée et amusante, ce qu'il a vu de l'autre côté de l'océan. Jamais il ne cherchera à s'attribuer la découverte de nouvelles terres. Pour la petite histoire, signalons que la belle-sœur de Vespucci, Simonetta, était

sans doute la plus belle femme de Florence. On la surnommait la « Sans Pareille ». Elle mourut en 1476 à l'âge de 23 ans. On dit que Botticelli avait gardé son image en tête (il en avait réalisé un portrait vers 1474) et s'en inspira pour *Le Printemps*, peint un an plus tard.

Colomb ne touchera le continent qu'à son troisième voyage, le 4 août 1498, en accostant dans la région de Paria-Cumana. Il sera alors persuadé d'avoir découvert une *terre ferme, immense et dont, jusqu'à ce jour on n'a rien su*. Quant à Vespucci, il mourut sans doute sans savoir que le Nouveau Monde portait désormais son nom. Comment cela s'était-il passé ?

Le Gymnase vosgien

La ville de Saint-Dié-des-Vosges doit son nom au moine évangélisateur irlandais saint Déodat qui y fonda un monastère en 669. Elle fait alors partie du duché de Lorraine. Dirigée par des chanoines à partir du Xe siècle, elle tire ses ressources des moulins et des vignobles, puis de l'exploitation des mines de plomb argentifère situées à dix kilomètres de la ville. L'église de Saint-Dié relève directement du pape. Les ducs de Lorraine, qui sont ses protecteurs, ne manquent jamais de venir jurer, à genoux, de lui conserver ses droits et ses privilèges. En 1470, le duché échoit à René II, comte de Vaudémont (Angers, 2 mai 1451 - Fains, 10 décembre 1508), qui a renoncé, par un accord avec le roi de France Charles VIII, à l'héritage de la maison d'Anjou dont il descend par sa mère, Yolande d'Aragon, fille du célèbre roi René. Jeune, cultivé et intelligent, il s'entoure d'humanistes qu'il nomme chanoines des grandes églises de Lorraine, Nancy, Toul, Bar-le-Duc et Saint-Dié. Les arts ne sont pas oubliés.

Un petit groupe d'érudits, férus de géographie, se forme à Saint-Dié au sein du *Gymnasium Vosagense*, le Gymnase vosgien, fondé en 1490 par le chanoine Gauthier (ou Vautrin) Lud (Saint-Dié, 1448 - Saint-Dié, 1527), secrétaire et chapelain du duc René II, maître général des mines de Lorraine et, à partir de 1505, sonrier (économe) de Saint-Dié, c'est-à-dire administrateur des biens temporels de la collégiale. Quatre autres personnes composent le Gymnase : Nicolas Lud, neveu de Gauthier, secrétaire en l'hôtel du duc de Lorraine et attaché à l'administration des mines, le cartographe allemand Martin Waldseemüller (Fribourg-en-Brisgau ou Radolfzell, ca. 1474 - Saint-Dié, ca. 1520), dit Ilacomilus,

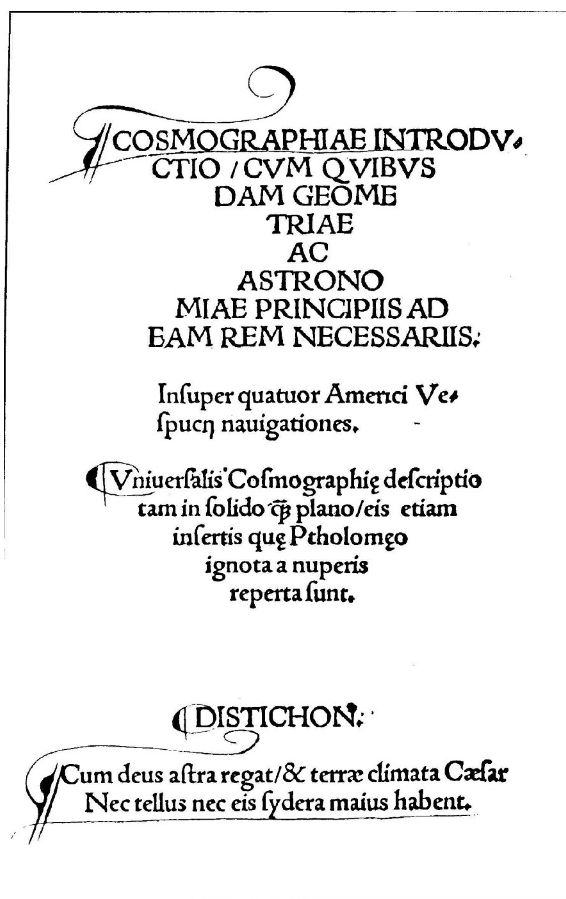
l'helléniste, savant et correcteur d'imprimerie Mathias Ringmann (Eichhoffen, 1482 - Sélestat, 1511), dit Philesius, et le latiniste et poète Jean Basin (Sandaucourt, ca. 1470 - Saint-Dié, avril 1523).

Gauthier Lud s'intéressait à la cartographie. Il avait mis au point une méthode de projection stéréographique du Globe terrestre. Les principaux lieux étaient indiqués sur un disque mobile. L'Europe couvrait 30° de latitude, entre le pôle et l'équateur, et 83° de longitude. Ce disque tournait au-dessus d'un cercle fixe où les heures étaient indiquées. Ce travail, sorti des presses de l'imprimeur strasbourgeois Jean Grüninger en 1507, est intitulé *Speculi Orbis succintiss. sed ne que poenitenda neqz inelegans Declaratio et Canon.*

Les ateliers cartographiques sont alors peu nombreux en Lorraine. Rappelons que la fameuse *Bible à 42 lignes* de Gutenberg date de 1456. Le duc René II s'enthousiasme pour cette technique nouvelle et veut établir une imprimerie dans son duché. Un premier atelier de typographie est installé à Sain-Nicolas-de-Port en 1501, puis, un an plus tard, un second à Longeville-devant-Bar. Dès 1505, après avoir vu le *Mundus Novus* de Vespucci ainsi que ses quatre lettres à Soderini, dont René II a reçu une copie, Gauthier Lud conçoit la publication de la *Géographie* de Ptolémée dans laquelle il veut introduire les terres nouvellement découvertes. L'atelier de Saint-Dié entre en service en 1506. Quand Mathias Ringmann le rejoint, vers mars 1507, Waldseemüller y travaille déjà depuis plus d'un an.

Le 25 avril 1507, le Gymnase vosgien fait paraître deux tirages d'une *Cosmographiæ introductio cum quibusdam geometriae ac astronomiae principiis ad eam rem necessariis, In super quatuor America Vespucci navigationes.* C'est un petit opuscule comportant 52 feuillets (104 pages), quatre figures et une planche pliante gravée sur bois. On le trouve à l'adresse : http ://gallica2.bnf.fr/ark :/12148/bpt6k52919c.image.f1. langFR). D'autres éditions suivront. L'opuscule comporte deux parties. La première se compose d'une introduction, en latin, à la géodésie où les auteurs expliquent la nécessité de rééditer la *Géographie* de Ptolémée, projet justifié par la découverte de terres nouvelles. Dans plusieurs chapitres, il est fait allusion aux expéditions de Vespucci, prénommé ici Americo. Et, au chapitre VII, il est écrit qu'il existe une

> *quatrième partie du monde que l'on peut appeler Ameri-gê, c'est-à-dire terre d'Amérique pour ainsi parler, ou* America, *puisque c'est Amérigo qui l'a découverte.*



COSMOGRAPHIAE INTRODV-
CTIO / CVM QVIBVS
DAM GEOME
TRIAE
AC
ASTRONO
MIAE PRINCIPIIS AD
EAM REM NECESSARIIS.

Inſuper quatuor Americi Ve-
ſpucij nauigationes.

Vniuerſalis Coſmographię deſcriptio
tam in ſolido quam plano / eis etiam
inſertis quę Ptholomęo
ignota a nuperis
reperta ſunt.

DISTICHON.

Cum deus aſtra regat / & terræ climata Cæſar
Nec tellus nec eis ſydera maius habent.

La *Cosmographiæ introductio* du Gymnase vosgien

Dans le chapitre IX, on trouve, en face du mot *America* imprimé dans la marge

> *Aujourd'hui ces parties de la terre* [Europe, Asie, Afrique] *ont été plus complètement explorées, et une quatrième partie a été découverte par Amérigo Vespucci, ainsi que l'on verra plus loin. Et comme l'Europe et l'Asie ont reçu des noms de femmes, je ne vois aucune raison pour ne pas appeler cette autre partie Ameri-gê, c'est-à-dire terre d'Amérigo, ou* America, *d'après l'homme sagace qui l'a découverte. On pourra se renseigner exactement sur la situation de cette terre et*

> *sur les coutumes de ses habitants par les quatre navigations d'Amérigo qui suivent. Ainsi, les quatre parties de la terre sont désormais connues : les trois premières sont des continents, la quatrième est une île, puisqu'on voit qu'elle est entourée d'eau de toute part. Et même si la mer est unique comme la terre elle-même, elle est pourtant séparée en nombreuses parties et remplie d'îles, innombrables et de toutes espèces.*

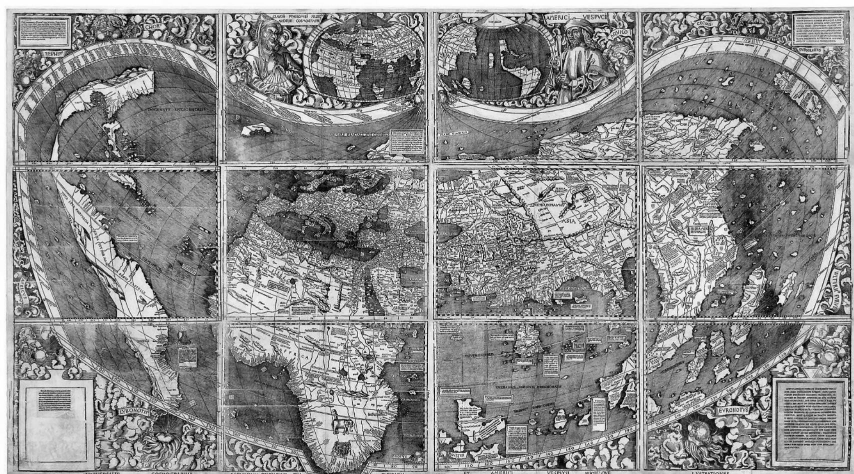
La seconde partie de l'opuscule s'ouvre sur un poème de vingt-deux vers de Mathias Ringmann. Puis vient la traduction de Jean Basin, du français en latin, des quatre lettres de Vespucci à Soderini.

Il ne semble pas possible d'attribuer avec certitude la rédaction de la première partie de cet opuscule à l'un ou à l'autre des membres du Gymnase vosgien. Sans doute est-il né de leur réflexion commune.

Dans la dédicace à l'empereur Maximilien Ier de Habsbourg, il est mentionné que deux cartes (*tam in solido quam plano*) sont jointes à l'opuscule, une mappemonde plane et une carte en douze fuseaux horaires de 12 cm de largeur pouvant être assemblés et collés sur une sphère pour former un globe de 18 cm de diamètre. Cette carte en fuseaux est connue sous le nom de son propriétaire, le général Franz Ritter von Hauslab (Vienne, 1er février 1798 - Vienne, 11 février 1883) qui la présenta en 1871 lors d'un congrès géographique à Anvers. Le nom de l'Amérique s'y trouve. La carte passa ensuite dans la collection du prince de Lichtenstein et elle est maintenant conservée à l'université du Minnesota. La publication vosgienne pouvait également être acquise seule, sans les cartes.

On connaît deux autres cartes de Martin Waldseemüller de 1507 où figurent l'Amérique et la mention *America.* L'une est la mappemonde intitulée *Universalis cosmographia secundum Phtolomaei traditionem et Americi Vespucii aliorumque lustrationes* qu'il dessina en 1506-1507. C'est la première carte murale (1.290 × 2.320 mm) du monde jamais imprimée. Elle se compose de douze planches 430 × 580 mm. Une modification de la projection conique de Ptolémée est utilisée. Le planisphère est en forme de cœur. Il est surmonté de deux médaillons, celui de gauche représentant Ptolémée et celui de droite Amerigo Vespucci, un compas à la main. Les méridiens sont incurvés et les latitudes y figurent. Selon la tradition, l'Europe et l'Afrique sont au centre, l'Asie à droite. À gauche, le continent américain est très mince et très allongé. Il s'étend, au nord,

de 11° à 53°, et, au sud de 9° jusqu'au bord du planisphère, un peu au sud de Port-Saint-Vincent vers 40°. Les îles Isabella (Cuba) et Hispaniola (Saint-Domingue, Haïti) découvertes par Colomb sont représentées. Le nouveau continent est divisé en deux parties, séparées par un détroit. Elles sont toutes deux entourées d'eau et ne sont pas rattachées à l'Asie comme le croyait Christophe Colomb. Le cartographe a bien pris soin de border à l'ouest les terres nouvelles par un océan (le Pacifique, alors inconnu) afin que l'on voie bien qu'il s'agit d'un quatrième continent (en contradiction avec le texte cité plus haut) et non de petites îles séparées. De plus, curieusement, l'Amérique du Nord est bordée à l'ouest par une chaîne de montagnes, alors que les montagnes Rocheuses sont inconnues ! Le mot *America* y figure, placé assez bas dans le sud de l'Amérique latine. Cette dénomination est rapidement adoptée par tous. Cette mappemonde, initialement tirée, pense-t-on, à un millier de copies, a longtemps été perdue. Il n'en subsiste actuellement qu'un seul exemplaire connu qui a longtemps appartenu à Johannes Schöner. Il fut retrouvé en 1901 par Joseph Fischer, un professeur de géographie du collège jésuite de Feldkirch en Autriche, dans la bibliothèque du château de Wolfegg, dans le sud de l'Allemagne. La bibliothèque du Congrès des États-Unis le racheta au prince Johannes de Waldburg-Wolfegg en 2003 par la somme de dix millions de dollars.



La mappemonde *Universalis cosmographia*
de Martin Waldseemüller

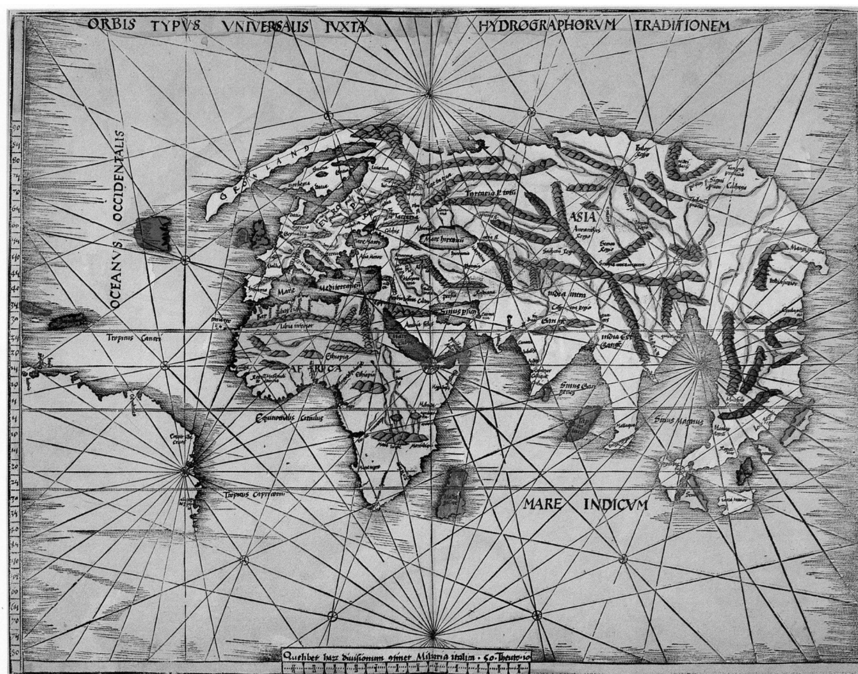
On rencontre sur la carte *Universalis cosmographia* de 1507 plusieurs indications qui montrent que ses concepteurs connaissent les découvertes de Christophe Colomb. Son nom est en effet cité dans un cartouche, placé en face de l'Amérique du Sud, comme étant l'inventeur des îles. La même carte comporte, en bas à gauche de la première feuille, un autre cartouche qui mentionne que ces terres *furent récemment découvertes de 1497 à 1504, au cours de quatre expéditions maritimes dont deux furent envoyées par Fernand, sérénissime roi de Castille, et les deux autres dans les mers australes par dom Manuel sérénissime roi du Portugal ; Americo Vespucci fut l'un des capitaines et amiraux de ces flottes.*

La seconde carte de Waldseemüller est datée de la même époque. Elle porte le titre *Orbis typus universalis iuxta hydrographorum traditionem* et était sans doute destinée à la réédition de la *Géographie* de Ptolémée. Elle comporte les latitudes ainsi que des lignes droites qui se rejoignent en plusieurs points et rappellent les loxodromies des portulans. Pour cette raison, elle est connue sous le nom de carte hydrographique ou marine. Elle montre les îles Isabella, Hispaniola et la Jamaïque, mais le nouveau continent ne s'étend que des Antilles à la latitude de 40° sud. Le nom *America* y figure et une côte asiatique y est représentée. Un détail a son importance. La carte a été gravée sur bois et imprimée, puis tous les noms y ont été rajoutés ensuite en caractères typographiques. Cette carte ne fut découverte qu'en 1899 par le collectionneur Henry Newton Stevens (7 juin 1855 - 26 avril 1930), elle aurait fait l'objet d'un très faible tirage et sa diffusion aurait été restreinte. On en trouve un exemplaire à la bibliothèque John Carter Brown de Providence, Rhode Island.

La *Géographie* de Ptolémée paraît effectivement à Strasbourg en 1513. La carte de Waldseemüller s'y trouve, mais, cette fois, avec la nomenclature gravée dans la planche de bois. L'Amérique y est représentée, mais la mention *America* a été remplacée par *Terra incognita.* Ce n'est que dans l'édition de 1522 qu'elle retrouvera son nom.

En donnant le nom d'*America* au Nouveau Monde, les chanoines de Saint-Dié ont peut-être voulu marquer la différence entre la découverte d'îles et celle d'un continent. Une autre question se pose : pourquoi utiliser comme dénomination le prénom du découvreur au lieu de son nom de famille ? On peut y trouver plusieurs raisons ; la première est euphonique, *America* est plus facile à prononcer que, par exemple, *Vespuccia*, et plus simple à retenir aussi. Le nom commence par un *A* comme celui

de deux autres continents. Enfin, à cette époque, il était plus courant d'appeler les personnes par leur prénom que par leur patronyme.



La carte *Orbis Typus*
de Martin Waldseemüller

Le *Globe vert*, réalisé vers 1506-1507, est un globe manuscrit attribué à Martin Waldseemüller et qui pourrait avoir servi à l'élaboration de la mappemonde *Universalis cosmographia* de 1507, alors en cours de réalisation. C'est une sphère en bois, de 24 cm de diamètre, recouverte de kaolin ; les océans y sont peints en bleu et les terres en brun-jaune, mais le bleu est devenu vert après vernissage. L'Amérique est divisée en trois parties séparées par deux détroits ; le nom d'*America* y figure à quatre reprises, au nord, au centre et deux fois au sud. Un terre australe apparaît également, séparée du continent par un détroit au sud.

Cette *Cosmographiæ introductio* est bien la première œuvre où le nom de l'Amérique est mentionné, mais ce n'est pas la première carte où sont représentés les territoires nouveaux. En 1500, en effet, Juan de La Cosa, pilote et propriétaire de la *Santa Maria* qui avait participé aux deux

premiers voyages de Colomb et à celui d'Alonso de Ojeda (Cuenca, ca. 1465 - Saint-Domingue, 1515) et Vespucci vers l'actuel Nicaragua, fait paraître une carte de format 955 × 1770 mm, constituée de plusieurs feuilles de vélin assemblées, où le Nouveau Monde est dessiné en petit et de manière grossière. Vient ensuite la carte dite de Cantino qui date de 1502. Alberto Cantino était un représentant du duc de Ferrare ; il fit sortir ce planisphère du Portugal pour l'emmener en Italie où il se trouve toujours (Biblioteca Estense, à Modène). Plusieurs cartographes semblent avoir participé à son élaboration et des notes manuscrites y sont rajoutées, que certains pensent être de la main même de Vespucci. Les îles des Caraïbes y sont représentées ainsi qu'une partie de la côte du Brésil, découvert par hasard en 1500 par Pedro Álvares Cabral, qui avait alors émis l'hypothèse qu'il s'agissait d'un nouveau continent. Cette côte fut ensuite explorée par Gonçalo Coelho (Florence, 1451 ou 1454 - Séville, 1512) et Amerigo Vespucci. L'Amérique du Nord est en plusieurs parties : le sud du Groenland, l'est de Terre-Neuve, et une péninsule qui ressemble à la Floride. L'absence de côte entre Terre-Neuve et la Floride peut suggérer l'existence d'un passage vers l'ouest.

Puis on trouve, vers 1505, le planisphère du génois Nicolaus de Caverio (ou Nicolo Caveri), composé de douze feuilles de parchemin qui forment une carte de format 1150 × 2250 mm et est basé sur le troisième voyage de Vespucci et sur celui du portugais Fernão de Noronha (ou Loronha), dit Fernando de Noronho (ca. 1470 ou avant - ca. 1540, Lisbonne), effectué en 1503-1504, et fait le point des côtes des quatre continents. Cependant, il nous montre le nouveau continent séparé en deux parties car l'Amérique Centrale, non reconnue alors, en est absente. Naturellement, tous ces contours seront ultérieurement précisés, déjà même sur la mappemonde de Jean Vespucci, le neveu d'Amérigo, qui date de 1526. Mais la dénomination d'Amérique n'y figure pas !

C'est le naturaliste allemand Alexander von Humboldt qui attira l'attention sur le livre de l'écrivain américain Washington Irving, *Histoire de Christophe Colomb*, paru en 1828, où celui-ci signalait qu'il venait de découvrir que le nom de l'Amérique avait été donné au nouveau continent par les chanoines de Saint-Dié. (voir Biblio : Ronsin, Pelletier, Ronsin, Zweig).

Et les Chinois ?

En 2003, est paru un livre (traduit en français en 2007) au titre étrange *1421, l'année où la Chine a découvert l'Amérique*. Son auteur, Gavin Menzies (né à Londres en 1937), est un ancien commandant de sous-marins de la *Royal Navy* qui a beaucoup parcouru le monde pour les besoins de sa carrière. Avant d'examiner quelles sont ses thèses, retraçons un peu l'histoire de cette période en Chine.

Yongle (1360 - 1424) est le troisième empereur de la dynastie Ming. Il règne de 1402 à 1424 après avoir renversé son neveu l'empereur Jianwen. Il est à l'origine de la construction de la *Cité interdite* de Pékin. Il a une politique expansionniste et veut étendre les limites de la Chine, aussi bien vers le nord (il transfère la capitale de Nankin à Pékin vers 1420 selon certaines sources) que vers le sud.

Zheng He (ou Cheng Ho) naquit en 1371 à Kunming dans la province, alors mongole, du Yunnan, d'un père hâdjdjî ayant fait son pèlerinage à la Mecque. Il était un Hui, c'est-à-dire un Chinois Han musulman. Il est également possible qu'il soit d'origine cham musulmane, car le royaume de Champā arrivait alors jusqu'à la bordure méridionale du Tonkin avec le Yunnan au nord. Sa famille se disait parente d'un gouverneur mongol mandaté au Yunnan et descendante du roi Mohammed du royaume de Bukhara. Son nom d'origine était Ma Sanpao (Ma est la première syllabe de Mahomet). On ne connaît que peu de choses sur son enfance. Son père fut tué lors de l'invasion du Yunnan par l'armée de l'empereur de Chine. Lui-même fut capturé et castré à l'âge de 9 ans, comme c'était la coutume pour les fils des chefs de guerre rivaux faits prisonniers. Il était destiné à faire partie des eunuques de la cour impériale. Les eunuques possédaient beaucoup de pouvoir grâce à leur relation privilégiée avec l'empereur, ainsi gravit-il petit à petit les échelons et devint-il le grand eunuque impérial.

Il change son nom en Zheng He (Chêng Ho) en 1404. L'empereur Yongle le nomme amiral de la flotte impériale, bien qu'il n'ait aucune expérience de la mer. La construction de centaines de navires est lancée à Nankin (ce qui réduit de moitié les forêts du sud de la Chine). À cette époque, la marine chinoise est la plus puissante du monde, tant par le nombre (estimé à 70) et la dimension de ses navires (une soixantaine de mètres, alors que la *Santa Maria* de Colomb ne faisait que 30 mètres sur 8 de large), que par le nombre de marins (environ 30.000 hommes) et les

technologies utilisées (l'aimantation artificielle qui permet de fabriquer des boussoles, les voiles lattées et le gouvernail d'étambot).

De grandes expéditions sont décidées dans tout l'océan Indien. Elles n'aboutissent cependant à aucune colonisation. La Chine se considère alors comme le centre du monde, l'*Empire du milieu*, et ces expéditions sont uniquement destinées à montrer la puissance de l'empire des Ming et à gagner la reconnaissance de royaumes lointains. Il ne s'agit que d'échanges de produits de luxe et non de véritables opérations commerciales, celles-ci n'étant ni rentables économiquement, ni motivées par un enjeu politique primordial. Seul le prestige compte. La différence est donc grande avec les expéditions européennes qui partiront à la recherche de l'or et des épices. À partir de 1433, la Chine se repliera d'ailleurs sur elle-même pour vivre en autarcie. La construction de grands navires sera prohibée, les grandes jonques et leurs plans seront détruits, réduisant ainsi à néant l'immense potentiel chinois en matière d'exploration et toute leur capacité à empêcher l'arrivée des Européens dans ses mers et sur ses côtes.

L'amiral Zheng He effectue sept voyages entre 1405 et 1433. Il explore ainsi toutes les côtes de l'Asie du Sud-Est (Java et Sumatra) et toutes les îles de l'océan Indien (en particulier l'actuel Sri Lanka). Il remonte également la mer Rouge jusqu'en Égypte et descend le long des côtes africaines jusqu'au Mozambique. Il en ramène d'ailleurs des girafes. C'est à la suite de l'une de ces expéditions que le sultan de Malindi (dans l'actuel Kenya) instaure, en 1414, des relations diplomatiques avec la Chine. La première compilation, destinée à l'Empereur, date approximativement de 1416 ; sa version finale est imprimée en 1451. Ces expéditions sont également retracées dans quatre livres importants. Le premier, dû à Kung Chen, date de 1434 et est rapidement suivi par l'ouvrage de Fei Hsin en 1436 ; ces deux hommes sont des officiers de Zheng He. Puis vient le tour du livre de Ma Huan, un interprète chinois musulman de Zheng He, issu de la même région que lui et peut-être de la même famille, en 1451. Il a rapporté minutieusement ses observations sur la géographie, les lois, la politique, les conditions climatiques, l'environnement, l'économie et les coutumes locales. Le dernier livre, par Huang Sheng-Tsheng, paraît en 1520. On possède des cartes, mais elles sont plus tardives (1621). Zheng He meurt en 1435 et il est enterré à Nanjing. La réalité de ses expéditions n'est pas contestée par les historiens.

La sixième expédition de Zheng He eut lieu en 1421-1422. Selon Menzies, la flotte fit d'abord escale à Calicut, la capitale du Kerala. Elle se sépara ensuite pour accomplir diverses missions secondaires, puis se regroupa à Sofala, sur la côte africaine en face de Madagascar. Après avoir doublé le cap de Bonne-Espérance, elle serait remontée dans l'Atlantique jusqu'à la bosse de l'Afrique en face de Dakar et, poussée par les courants, elle aurait atteint les îles du Cap-Vert, fin septembre 1421. Un vent d'est, constant dans cette région, ainsi qu'un courant océanique se dirigeant vers l'ouest, aurait entraîné les jonques à travers l'Atlantique. Au niveau des Caraïbes, ce courant se scinde en deux parties, l'une va vers le nord jusqu'à la Nouvelle-Angleterre (c'est le Gulf-Stream) et l'autre vers l'Amérique du Sud. La flotte chinoise se serait également séparée en deux, une partie faisant route vers les Caraïbes et l'Amérique du Nord, l'autre allant vers le sud et atteignant le Brésil puis les Malouines. D'après Menzies, la flotte du sud se serait de nouveau partagée en deux, certaines jonques franchissant le détroit de Magellan pour explorer la côte ouest de l'Amérique et d'autres allant jusque dans les eaux de l'Antarctique. Les côtes de l'Australie auraient même été atteintes.

Certains indices peuvent laisser supposer que les Chinois auraient bien pu contourner le cap de Bonne-Espérance qui n'est qu'à une centaine de kilomètres seulement au sud de leur dernier lieu de débarquement consigné en Afrique. En 1879, on découvrit à Port Darwin, au nord de l'Australie, une statuette chinoise enterrée à plus d'un mètre sous les racines d'un banian âgé d'au moins deux siècles. Cela renforce les récits aborigènes des Baijini (Bai Jin signifie homme blanc en chinois) qui parlent d'hommes ayant une peau plus claire et une technologie plus avancée. De plus, les publications chinoises du XVe siècle montreraient une connaissance des vents et courants d'ouest en est. Menzies appuie également sa démonstration sur des céramiques, des stèles, des espèces animales et végétales, etc. Une stèle datant de 1432, découverte à Chhang-lo, dans la province de Fukien (située en face de Taïwan), en 1937, fait état de nombreux voyages jusqu'à Java, Calicut, Cochin, Ceylan, Ormuz et le golfe Persique, Aden et Mogadiscio, puis on peut lire

> *Nous avons traversé plus de cent mille li d'immenses espaces d'eau et nous avons aperçu dans l'océan des vagues énormes comme des montagnes aussi hautes que le ciel. Nous avons posé les yeux sur des régions barbares dissimulées très loin dans la transparence bleutée de la vapeur d'eau, tandis que*

> *nos bateaux, voiles fièrement déployées comme des nuages, continuaient leur route nuit et jour avec une belle vitesse, affrontant les vagues sauvages comme si nous suivions une grande route publique.*

Mais ces thèses sont très contestées pour diverses raisons. Elles ont été élaborées à partir de cartes italiennes et portugaises antérieures à 1492 qui montrent des îles et des terres inconnues que tous les historiens considèrent comme imaginaires. Seuls les universitaires chinois y ajoutent foi. Plusieurs cartographes ont indiqué que les cartes sur lesquelles Gavin Menzies s'appuyait n'étaient pas authentiques, quelques unes étant même des faux grossiers. De toute façon, aucune des cartes chinoises authentifiées postérieures à la découverte supposée de l'Amérique, qui s'apparentent d'ailleurs plus aux portulans européens de la même époque, ne la représente. Il existe bien une carte réalisée en Corée en 1402, le *Kangnido*, à partir de sources chinoises et où un cap figure au sud de l'Afrique. Elle est en fait basée sur des informations transmises par les musulmans qui avaient sans doute pu atteindre le cap de Bonne-Espérance bien avant que l'Europe eut connaissance de son existence. Mais, d'après l'historien Mauricio Obregòn, il est cependant certain que les Chinois ne le doublèrent pas (il ne le sera qu'en janvier 1488 par le navigateur portugais Bartolomeu Dias).

Menzies décrit la conception des jonques chinoises de haute mer, formées de plusieurs caissons étanches, et donne d'autres détails sur leur construction et leurs dimensions (pp. 61ff.). Cependant, même si elles surpassent en taille les caravelles occidentales, les jonques chinoises sont bien moins maniables. Elles ont un fond plat et ne peuvent naviguer que vent arrière. Pour cette raison, elles ne peuvent sortir de la zone des moussons et doivent attendre, d'une saison à l'autre, que les vents s'orientent dans l'un ou l'autre sens. Comment alors auraient-elles pu s'aventurer si loin ? Mentionnons que, d'après d'autres sources, ces jonques pouvaient cependant remonter remarquablement au vent et possédaient d'exceptionnelles qualités. Mais Menzies ne semble jamais s'interroger sérieusement sur leur navigabilité en plein océan. En fait, toutes les terres où les Chinois ont, sans aucun doute, accosté peuvent être atteintes presque uniquement par cabotage depuis la Chine, ce qui n'est certainement pas le cas pour l'Amérique. Le livre de Menzies ne comporte aucune référence bibliographique qui montrerait que l'auteur a contrôlé ce point. Des compléments sur les qualités hauturières de ces jonques seraient indispensables pour une conclusion définitive de la

question. Dans ses monumentaux ouvrages sur la science chinoise, Joseph Needham (Londres, 9 décembre 1900 - Cambridge, 24 mars 1995) ne fait mention que de jonques « océaniques », mais sans donner de précision sur leurs capacités.

Et que dire des autres voyages dont Menzies crédite les Chinois ? Par exemple, comment auraient-ils pu franchir le détroit de Davis qui sépare le Groenland de l'île de Baffin au nord du Canada ? Et enfin Menzies, toujours prompt à rendre à César ce qui appartient à César, ne mentionne Vespucci qu'une seule fois, parmi d'autres noms. Fâcheux oubli !

En 2001, Liu Gang, un avocat et collectionneur chinois, fit l'acquisition chez un antiquaire d'une carte chinoise où l'Amérique était représentée. Elle serait, soi-disant, une copie d'une carte datant de 1418, mais une autre source indique qu'elle serait due à Mo Yi Tong, en 1763. D'après plusieurs cartographes, il s'agirait d'un faux. Sa datation scientifique est en cours. C'est, en fait, le seul document de référence sur cette prétendue découverte car les archives des expéditions chinoises ont été détruites à la fin du XVe siècle. Liu Gang réalisa l'importance de son achat seulement après avoir lu le livre de Menzies.

Mais peut-être s'agit-il d'un autre... *Da Vinci Code* ?

De quelques instruments

Nous allons donner ici, par ordre alphabétique, une brève description des quelques instruments de mesure utilisés. Il peut, naturellement, exister des variantes de chaque instrument ainsi que des appellations diverses. L'utilisation correcte et le réglage précis de ces instruments constituent une part essentielle de la formation et du travail des topographes. On trouvera leur description détaillée dans de nombreux ouvrages anciens et récents. (voir Biblio : Gabriel).

Alidade et planchette

L'*alidade* est une règle horizontale aux extrémités de laquelle sont montées verticalement deux petites plaques (les *pinnules* qui, en général peuvent être rabattues) percées d'un petit orifice ou d'une fente avec un fil mince en leur milieu. En général, on place l'alidade sur une *planchette* qui est une planche à dessin montée sur un trépied et qui peut être inclinée à volonté grâce à un genou à coquilles. On y fixe un cercle gradué pour pouvoir mesurer l'angle entre deux points en les visant successivement à travers les pinnules et en lisant le résultat sur le cercle gradué. C'est un instrument très ancien et son utilisation fut longtemps fondamentale. L'alidade nivellatrice du colonel Goulier permet de tracer les directions des lignes de terrain sur la planchette et de mesurer leur pente.

Arbalète

L'*arbalète*, encore appelée *arbalestrille* ou *bâton de Jacob*, sert à mesurer la hauteur des astres. Son principe est simple. On fait coulisser sur une grande tige graduée, une seconde règle (le *marteau*) qui lui est perpendiculaire et possède deux bras égaux. On place l'œil à l'extrémité de la grande tige et l'on fait coulisser le marteau de sorte que l'une de ses extrémités coïncide avec l'horizon et la seconde avec l'astre dont on veut mesurer la hauteur. Celle-ci se lit directement sur les graduations

de la grande tige. Mathématiquement, il s'agit de deux triangles isocèles semblables ; on a une situation d'homothétie. Certaines arbalètes comportent plusieurs marteaux. L'arbalète peut également servir à mesurer la distance entre deux astres ou même entre deux points. Son invention pourrait remonter aux Chaldéens entre le IXe et le VIe siècle av. J.-C. Sa plus ancienne description serait due au mathématicien et astronome Levi ben Gerson, dit Gersonides, (Bagnols-sur-Cèze, 1288 - Perpignan, ca. 1344) en 1342.

Astrolabe

L'*astrolabe* est fort ancien. Son principe de construction est connu depuis l'antiquité grecque, son nom signifiant, dans cette langue, « preneur d'astres ». Il s'agit, en effet, d'un instrument destiné à mesurer la hauteur des astres, à en déduire l'heure et à s'orienter. Il fait appel à toutes les connaissances que l'on avait alors. Il a sans doute été inventé par Hipparque et fut décrit par Ptolémée. Son utilisation a été répandue par les Arabes à partir du VIe siècle, en particulier par Jean Philopon, un philosophe, théologien et grammairien byzantin, chrétien, né vers 490 ou 480 et mort en 566. Il fut largement utilisé jusqu'à l'apparition d'instruments plus simples et performants au XVIIe siècle.

L'astrolabe planisphèrique est basé sur une double projection stéréographique polaire plane. Il comporte quatre parties. D'abord la *matrice*, ou *mère*, qui est un anneau plat avec des branches se rejoignant en son centre. Elle supporte les autres pièces sur son axe central. Son pourtour comporte un cercle gradué en heures afin de permettre la mesure des angles horaires et l'orientation de l'araignée en fonction du mouvement diurne. Puis le *tympan*, qui est fixe et comporte la projection sur le plan de l'équateur du zénith, de lignes de même azimut et de cercles de même hauteur. Il permet de repérer les étoiles grâce à leurs coordonnées locales. La projection du zénith dépend de la latitude et le tympan doit donc être changé lorsque l'on change de lieu d'observation. L'envers du tympan, qui peut se voir puisque la matrice est un anneau, comporte un cercle gradué en degrés pour mesurer la hauteur des astres à l'aide d'une alidade, au dos de la matrice, qui permet de viser un astre. Sa ligne médiane repère l'ascension droite. L'alidade est munie d'un anneau pour la suspendre verticalement. Sur le tympan, vient se fixer une pièce mobile, l'*araignée*, qui est souvent une véritable œuvre d'orfèvrerie. Elle fournit une projection stéréographique de la sphère céleste au lieu d'observation et ses crochets indiquent les étoiles les plus remarquables

ainsi que l'écliptique. Elle tourne autour du pôle Nord et ne dépend pas du lieu considéré. Son bord externe est gradué en ascension droite et en jours de l'année. On peut ainsi positionner le Soleil sachant qu'il se trouve sur l'écliptique et est aligné avec la date du jour. Les dimensions de l'astrolabe déterminent sa précision. Nous renvoyons le lecteur intéressé par son fonctionnement à la littérature spécialisée.

Cercle à réflexion et cercle répétiteur

À chaque mesure effectuée avec un instrument, aussi précis soit-il, on commet une erreur de lecture. L'idée est donc d'enchaîner plusieurs mesures sans revenir à zéro, de ne pas tenir compte des mesures intermédiaires et de ne lire que le résultat de la dernière observation. On ne commet ainsi qu'une unique erreur de lecture. Plus on fait de visées, moindre est l'erreur de lecture puisqu'elle est répartie entre plusieurs mesures. Il suffit ensuite de diviser la valeur finale lue par le nombre d'observations. Cette idée semble remonter au mathématicien et astronome allemand Tobias Mayer (Marbach, 17 février 1723 - Göttingen, 20 février 1762) qui, en 1752, était chargé d'importants travaux de topographie et de géodésie.

Selon ce principe, Mayer imagine le *cercle à réflexion*, un instrument destiné aux navigateurs. Malgré les vagues, il permet de mesurer un angle entre deux astres en utilisant deux miroirs parallèles. La difficulté était d'en vérifier le parallélisme. Jean-Charles Borda améliore l'instrument en le munissant d'un seul miroir semi-réfléchissant, ce qui permet de n'effectuer qu'une seule visée. L'espace entre la lunette et le miroir semi-réfléchissant laisse passer les rayons lumineux et l'on peut observer un astre soit à droite soit à gauche de la lunette. Par « retournement », on mesure le même angle une fois à droite et une fois à gauche. Un astre est visé une fois directement dans la lunette et une fois par réflexion. Et Borda de conclure

> *On voit donc que sans faire l'observation du parallélisme, on sera parvenu à trouver l'angle cherché et que l'on aura obtenu un double résultat, par une double observation, au lieu qu'il en aurait fallu quatre en employant la méthode de Mayer.*

C'est sur le même principe qu'est bâti le *cercle répétiteur* de Borda en 1786. Cet appareil est destiné à la mesure des angles. Il est constitué d'un cercle gradué, qui peut prendre n'importe quelle orientation, au centre duquel sont fixées deux lunettes, l'une en dessous et l'autre au-dessus, dont elles peuvent être solidaires ou non. En position horizontale, ce

cercle répétiteur permet de mesurer l'angle entre deux repères terrestres pour effectuer une triangulation. En position verticale, il sert à mesurer la hauteur d'une étoile. Il s'agit alors d'une observation astronomique.

Supposons que, du point O où nous sommes situés, nous voulions mesurer l'angle entre deux repères terrestres A et B, c'est-à-dire l'angle AOB. On pointe la lunette 1 vers A, après avoir réglé le zéro du cercle en direction de ce point, et la lunette 2 vers B. On bloque la lunette 1 sur le cercle. On tourne l'ensemble jusqu'à ce que la lunette 2 pointe vers A et on la bloque sur le cercle. On débloque la lunette 1, on lui fait viser B, puis on la solidarise avec le cercle. On fait pivoter l'ensemble afin que la lunette 1 pointe vers A. On libère la lunette 2 du cercle et on l'oriente vers B. On se retrouve alors dans la configuration de départ, mais le cercle a tourné de deux fois l'angle AOB et c'est le double de cet angle que l'on lit alors sur la graduation du cercle. On peut recommencer l'ensemble des opérations autant de fois que l'on désire ; il suffit, à la fin, de diviser l'angle total lu par le nombre de mesures effectuées. On procède d'une manière un peu différente pour mesurer la hauteur d'une étoile. Ces deux cercles furent construits par Étienne Lenoir. (voir Biblio : J. Lequeux).

On voit, avec ces deux instruments, que Borda était préoccupé par la précision des mesures, de toutes les mesures, puisqu'on lui doit également l'idée de la « double pesée ». On veut peser un objet M. On l'équilibre, sur le second plateau d'une balance de Roberval, avec une première tare T_1. On enlève M du plateau et on équilibre T_1 avec une seconde tare T_2. Les deux tares sont donc égales et égales à M. Pourquoi une telle opération, qui semble *a priori* compliquée ? Pour que T_1 soit égal à M, il faut que les bras des deux plateaux aient rigoureusement la même longueur, ce qui n'est jamais le cas. La mesure est donc imprécise et la double pesée permet de s'affranchir de cette erreur.

Mais Borda est aussi préoccupé par les mérites des différents modes de scrutin. Il propose, en 1770, un système de vote, dit « méthode de comptage Borda », qui était déjà en fait utilisée par le sénat romain jusqu'en 105. Chaque électeur classe l'ensemble des candidats par ordre de mérite et chaque candidat se trouve attribué un nombre de points égal au nombre de candidats classés derrière lui. Le score attribué à chaque candidat est la somme des points obtenus sur chaque bulletin.

Le cercle répétiteur de Borda sera perfectionné, en lui adjoignant une lunette, par Henri Prudence Gambey (Troyes, 8 octobre 1787 - Paris, 28 janvier 1847), un constructeur d'instruments scientifiques découvert par Arago. Gambey fabriquera, pour l'Observatoire de Paris, une lunette

méridienne (1823), une lunette équatoriale (1826), *l'un des plus beaux instruments qui soient jamais sortis de la main des hommes* selon Arago, et un cercle méridien mural (1843).

Éclimètre

L'*éclimètre*, ou *boussole-éclimètre* est une lunette mobile dans un plan vertical, munie d'un niveau et d'une boussole, et qui permet de mesurer les azimuts et les pentes. On doit son invention au lieutenant-colonel Goulier aux alentours de 1870. Un autre instrument du même type est la *règle holométrique* due au colonel Vidal, chef de la Section de topographie au Service géographique de l'armée, et mise au point en mai 1901 par Henne, un mécanicien du Dépôt des instruments de précision aux Invalides.

Goniographe et goniomètre

Le *goniographe* est un instrument composé d'une planche en bois (la planchette) et d'une lunette. Il était utilisé pour mesurer les angles dans les opérations de levés de terrain et le plan était immédiatement dessiné à la main sur une feuille de papier posée sur la planchette. Il ne faut pas le confondre avec le *goniomètre*, destiné au même usage mais basé sur le principe de la double réflexion.

Graphomètre

Le *graphomètre* est destiné à mesurer les angles, dans le plan horizontal. Il comprend deux alidades montées sur un demi-cercle gradué (le *limbe*) et comportant une boussole. L'une des alidades, nommée *ligne de foi* ou de *collimation*, est fixe et est dirigée selon le diamètre du limbe, l'autre est mobile autour du centre du limbe. La seconde partie de l'instrument est constituée de deux règles et d'un rapporteur qui permettent de reporter les mesures sur un schéma. Son principe est basé sur les triangles semblables. Cet appareil a été inventé en 1597 par Philippe Danfrie (Bretagne, ca. 1535 - Paris, ca. 1606), un dessinateur et graveur de caractères d'imprimerie et de monnaies qui avait inventé ou perfectionné divers instruments scientifiques, qu'il fabriquait lui-même. Il l'a décrit dans son ouvrage *Déclaration de l'usage du Graphomètre. -Traicté de l'usage du Trigomètre*. Ce *trigomètre* est un autre instrument du même type, qu'il fabriqua également et qui exploite le théorème de Thalès. L'*Henrymètre* (1598) d'Henry de Suberville, ainsi nommé en l'honneur d'Henry IV, appartient à la même famille d'instruments.

Sextant

Un *sextant* est un instrument de navigation permettant de relever la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon. En particulier, en relevant la hauteur angulaire du Soleil à midi, il fournit la latitude du lieu d'observation. Les Grecs et les Byzantins l'utilisaient déjà comme le prouvent ceux trouvés à Anticythère dans une épave du IIIe siècle av. J.-C. Héron d'Alexandrie (Ier siècle) en fait la description. Le sextant actuel fut précédé par l'invention du *quadrant*, formé d'un quart de cercle (soit 90°) et de l'*octant*, formé d'un huitième de cercle (soit 45°). L'octant fut mis au point vers 1730 indépendamment par l'astronome John Hadley (Bloomsbury, 16 avril 1682 - East Barnet, 14 février 1744) et par Thomas Godfrey (Bristol, Pennsylvanie, 1704 - décembre 1749), un inventeur américain. Le sextant, lui, utilise un sixième de cercle, c'est-à-dire 60°. Il est apparu vers 1759. Sa spécificité tient au fait que les deux directions dont on veut mesurer l'angle sont observées simultanément, ce qui rend la mesure à peu près indépendante des mouvements du navire. De plus, il se tient à la hauteur des yeux, alors qu'il était nécessaire d'accrocher l'astrolabe d'autant plus haut que l'astre à observer était élevé dans le ciel.

Un sextant est essentiellement constitué d'un grand miroir qui réfléchit le rayon provenant de l'astre vers un petit miroir incliné de manière à renvoyer ce même rayon vers l'œil de l'observateur. Le petit miroir est pour moitié réfléchissant (partie droite étamée) et pour moitié transparent (partie gauche vitrée) afin que l'observateur puisse viser simultanément l'horizon. Un bras mobile, qui pointe vers un limbe gradué fixé au bâti sur lequel on lit directement la hauteur de l'astre observé, est assujetti au grand miroir. Si l'on vise le Soleil ou la Lune qui ont des dimensions visibles, on ramène sur l'horizon l'image réfléchie du bord inférieur de l'astre. Pour les étoiles et les planètes, que l'on considère comme un point, on remonte l'image de l'horizon jusqu'à la hauteur de l'astre en retournant le sextant. Étant donné que la mesure de la hauteur d'un astre s'effectue à un instant donné, il est fondamental de connaître le temps (l'heure) de façon précise. Le sextant permet également de mesurer des distances, comme celle séparant le navire d'un phare de hauteur connue, ou celle de la position de l'observateur au pied du Soleil (c'est-à-dire le point où une droite joignant le centre du Soleil à celui de la Terre perce celle-ci). Dans ce dernier cas, la distance zénithale exprimée en minutes d'angle (90 diminué de la hauteur en minutes du bord inférieur du Soleil au-dessus de l'horizon) est égale à la distance en milles marins

entre l'observateur et le pied du Soleil. Les coordonnées du pied du Soleil sont fournies par des éphémérides.

Tachéomètre

Le *tachéomètre* (du grec *takhus*, rapide et *metron*, mesure) apparaît vers le milieu du XIXe siècle. Il s'agit d'un théodolite (voir ci-dessous) équipé d'un *télémètre stadimétrique* pour mesurer les distances en comparant un objet de hauteur connue avec une échelle contenue dans l'instrument. C'est, par excellence, l'instrument de la planimétrie nivelée. Il permet d'opérer rapidement et avec précision et d'établir une direction, de déterminer un angle horizontal ou vertical et de mesurer une distance horizontale ou verticale. Il en existe de plusieurs types.

Théodolite

Le *théodolite* aurait été inventé en 1571 par l'astronome anglais Thomas Digges (ca. 1546 - Londres, 24 août 1595). Il permet de mesurer les angles dans le plan vertical et dans le plan horizontal. Il est constitué d'une lunette montée sur deux axes, l'un vertical et l'autre horizontal. Chaque axe est équipé d'un cercle gradué. On le pose sur un support et sa base doit être parfaitement horizontale. En topographie, on ne mesure pas directement l'angle entre deux repères visibles, mais entre la verticale de ces signaux. On fait ainsi abstraction de la hauteur à laquelle sont situés les repères. Les angles ne sont mesurés que dans le plan horizontal, à l'aide d'une lunette de visée qui peut pivoter verticalement. En astronomie, le théodolite sert à mesurer l'azimut par rapport au pôle céleste ou la hauteur d'un astre.

Bibliographie

La littérature et les références sur les sujets traités ici sont absolument énormes. Par conséquent, seuls sont indiqués les documents dont je me suis réellement servi.

Les titres des livres sont en *italique*.

On trouvera de nombreuses cartes sur le site de la *Bibliothèque numérique mondiale*, thème *Histoire et géographie* : http ://www.wdl.org/fr/

Anonyme, *Topographie*, Ministère de la Guerre, Imprimerie Nationale, Paris, 1884.

Anonyme, *La nouvelle carte de France*, Service Géographique de l'Armée, Imprimerie du Service Géographique, Paris, 1923.

Anonyme, Cartographie, dans *Encyclopédie Microsoft Encarta en ligne 2004*, http ://fr.encarta.msn.com, Microsoft Corporation, 1997 - 2004.

Collectif, Conrad Peutinger, dans *Mémoires pour servir à l'histoire des hommes illustres dans la république des lettres avec un catalogue raisonné de leurs ouvrages*, Briasson, Paris, 1730, Tome XIII, pp. 328-347.

Collectif, *Le Service Géographique de l'Armée. Son histoire - Son organisation - Ses travaux*, Imprimerie du Service Géographique de l'Armée, Paris, 1938.

Collectif, *Cartes et figures de la Terre*, Catalogue de l'exposition , Centre Georges-Pompidou, Paris, 1980.

Collectif, *Dictionnaire des inventeurs et des inventions*, Larousse Bordas, Paris, 1996.

Collectif, Encyclopædia Britannica 2009, Ultimate Reference Suite, Encyclopædia Britannica, Chicago, 2009.

Collectif, Encyclopædia Universalis, Version 8, 2009.

K. Alder, *Mesurer le monde. 1792-1799 : l'incroyable histoire de l'invention du mètre*, Flammarion, Paris, 2005.

G. Alinhac, *Histoire de la cartographie*, Cours polycopié, École Nationale des Sciences Géographiques, Institut Géographique National, 1986.

L. et G. Aliprandi, *La découverte du Mont-Blanc par les cartographes, 1515-1925*, Priuli & Verlucca, Ivrea, 2000.

L. et G. Aliprandi, Les Alpes et les premières cartes-itinéraires au XVIe siècle, dans *Traverser les Alpes, 2000 ans d'histoire*, Catalogue de l'exposition, Espace Tairraz, Chamonix-Mont-Blanc, 21 décembre 2002-21 septembre 2003, pp 37-54.

L. et G. Aliprandi, La découverte du Mont Blanc, dans *L'invention du Mont-Blanc par les cartographes (1515-1925)*, L'Alpe, 7 (2000) 35-51, Glénat, Musée Dauphinois, Grenoble.

F. Arago, Histoire de ma jeunesse, dans *Œuvres complètes*, 3 vols., Gide et J. Baudry, Paris, 1854 ; réédition par Christian Bourgois, Paris, 1985.

V.L. Assur, A.M. Filatov, *Practical guide to surveying*, Mir Publisher, Moscow, 1988.

R. Baccou, *Histoire de la science grecque de Thalès à Socrate*, Éditions Montaigne, Paris, 1951.

P. Baiza, *Cosmographie élémentaire*, Les Éditions de l'École, Paris, 1946.

E. Balzamo, *O. Magnus, Carta Marina*, José Corti, paris, 2005.

P. Bayart, *La méridienne de France et l'aventure de sa prolongation jusqu'aux Baléares*, L'Harmattan, Paris, 2007.

A et M. Baynton-Williams, *Les nouveaux mondes. Cartes anciennes, XVe-XIXe Siècle*, Sélection du Reader's Digest, Bagneux, 2007.

Cdt Benoît, Le commandant Cholesky, Bulletin Géodésique, 1 (1922) 159-161.

Cdt. Benoît, Note sur une méthode de résolution des équations normales provenant de l'application de la méthode des moindres carrés à un système d'équations linéaires en nombre inférieur à celui des inconnues, (Procédé du Commandant Cholesky), Bulletin Géodésique, 2 (1924) 67-77.

A. Berget, *Topographie*, Librairie Larousse, Paris, 1929.

A. Berget, *Le ciel*, Librairie Larousse, Paris, 1932.

J.L. Berggren, A. Jones, *Ptolemy's geography. An annotated translation of the theoretical chapters*, Princeton University Press, Princeton, 2000.

H. Berthaut, *Topologie*, 2 vols. Service Géographique de l'Armée, Imprimerie du Service Géographique, Paris, 1909.

M. Blay, R. Halleux éds., *La science classique. XVIe-XVIIIe siècle. Dictionnaire critique*, Flammarion, Paris, 1998.

J. Black, *Regards sur le Monde. Une histoire des cartes*, Octopus/Hachette, Paris, 2004.

D. Boorstin, *Les découvreurs*, Seghers, Paris, 1986.

C. Brezinski, Géodésie, topographie et cartographie, Bull. Soc. Amis. Bib. Éc. Polytech., 39 (2005) 33-68.

C. Brezinski, La méthode de Cholesky, Rev. Hist. Math., 11 (2005) 205-238.

C. Brezinski, *Histoires de sciences. Inventions, découvertes et savants*, L'Harmattan, Paris, 2006.

C. Brezinski, *Ampère, Arago et Fresnel. Trois hommes, trois savants, trois amis. 1775 - 1853*, Hermann, Paris, 2008.

C. Brezinski, M. Gross-Cholesky, La vie et les travaux d'André Cholesky, Bull. Soc. Amis. Bib. Éc. Polytech., 39 (2005) 7-32.

L.A. Brown, *The story of maps*, Dover, Mineola, 1979.

Y. Caradec, *Histoire de la cartographie*, Mémoire de fin d'études, École Nationale de la Marine Marchande de Marseille, Marseille, 2001-2002.
http ://memoireshydroma.free.fr/histoire_cartographie.pdf

A. Cazenave, H. Le Meur, Les déformations de la Terre,
http ://www.larecherche.fr/content/impression/article ?id=18858

P. Célérier, *Histoire de la navigation*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 43, Presses Universitaires de France, Paris, 1956.

O. Chapuis, *Cartes des côtes de France. Histoire de la cartographie marine et terrestre du littoral*, Éditions du Chasse-Marée, Douarnenez, 2007.

O. Chapuis, *À la mer comme au ciel. Beautemps-Beaupré & la naissance de l'hydrographie moderne (1700-1850)*, Presses de l'université Paris-Sorbonne, Paris, 1999.

A. Chassagnette, La géométrie appliquée à la sphère terrestre. Le *De dimensione terrae* (1550) de Caspar Peucer, Histoire & Mesure, 21 (2006) 7-28.

R. Chevallier, *Sciences et techniques à Rome*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 2763, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

A. Cholesky, *Levés d'études à la planchette*, 3e édition revue par M. Lafosse, École Spéciale des Travaux Publics, Eyrolles, Paris, 1923.

A. Cholesky, *Cours de topographie. 2è partie. Topographie générale*, 7e édition, École Spéciale des Travaux Publics, Eyrolles, Paris, 1937.

P. Claval, *Histoire de la géographie*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 65, 3e édition., Presses Universitaires de France, Paris, 2001.

J. Clouet, *Ferdinand Berthoud, horloger des explorateurs*, Conservatoire du Patrimoine, 2007.

F. Cohn, J. Mascart, Théorie des instruments astronomiques de mesures angulaires, des méthodes d'observation et de leurs erreurs, dans *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, Édition Française, J. Molk et H. Andoyer éds., Tome VII, Volume 1, Gauthier-Villars et Cie, Paris et B.G. Teubner, Leipzig, 1916, réédition par Jacques Gabay, Paris, 1993.

N. Crane, *Mercator, the man who mapped the planet*, Weidenfeld & Nicholson, London, 2002.

E. Crouzet, *Éléments et principes de la topographie*, Imprimerie du Service Géographique de l'Armée, Paris, 1911.

J. Crovisier, L'astronomie de Jules Verne. Notes de lecture, 2004-2008.
http ://www.lesia.obspm.fr/ crovisier/JV/verne_3R3A.html

J. Crovisier, L'Astronomie de Jules Verne, dans *Jules Verne, les machines et la science*, P. Mustière & M. Fabre, eds., Coiffard Éditeur, Nantes, 2005, pp. 66-73.

R. Cuenin, *Cartographie générale*, 2 vols., Éditions Eyrolles, Paris, 1972.

E.H. Dahl, J.-F. Gauvin, *La découverte du monde, une histoire des globes terrestres et célestes*, Privat, Toulouse, 2001.

G. Darboux, Notice historique sur Antoine d'Abbadie, Séance publique annuelle de l'Académie des Sciences, 2 décembre 1907.
http ://www.academie-sciences.fr/abbadie/Abbadie_Darboux.pdf

M. Daumas éd., *Histoire de la science*, Encyclopédie de la Pléiade, Éditions Gallimard, Paris, 1957.

P. Del Santo, G. Strano, *Machina Mundi. Images and measures of the cosmos from Copernicus to Newton*, Edizioni Polistampa, Florence, 2004.

J.B.J. Delambre, *Rapport historique sur les progrès des sciences mathématiques depuis 1789 et sur leur état actuel*, Imprimerie Impériale, Paris, 1810, réédition par B.M. Israël, Amsterdam, 1966.

A. Djebar, *L'âge d'or des sciences arabes*, Le Pommier/Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris, 2005.

J. Dufailly, *Cosmographie*, Librairie Ch. Delagrave, Paris, 1887.

M. Dupuy, H.-M. Dufour, *La géodésie*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 1320, Presses Universitaires de France, Paris, 1969.

A.J. Durán Guardeño, *El legado de las matemáticas de Euclides a Newton : los genios a través de sus libros*, Consejería de Cultura, Sevilla, 2000.

Ch.-L. Durand-Claye et al., *Lever des plans et nivellement*, Librairie Polytechnique Baudry et Cie, Paris, 1889.

M. Duranthon, *La carte de France et son histoire, 1678-1978*, Solar et IGN, Paris, 1978.

C. Durier, *Le Mont-Blanc*, Librairie Fischbacher, Paris, 1923.

N. Ermolaeva, Les mathématiciens de Saint-Pétersbourg et les problèmes cartographiques, Arch. Int. Hist. Sci., 58 (2008) 225-270.

L. Eyrolles, E. Prévot, E. Quanon, *Cours de topographie. Livre I : Topométrie*, 25e édition, Librairie de l'Enseignement Technique Léon Eyrolles, Paris, 1938.

D. Fauque, Une curieuse expérience : l'attraction des montagnes, Les Génies de la Science, no. 39 (mai-juillet 2009) 14-16.

J. Favier, *Les Grandes Découvertes d'Alexandre à Magellan*, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1991.

E. Gabriel, *Éléments de topographie et tracé des voies de communication*, A. Mame et fils, Tours et J. de Gigord, Paris, 1914.

P. Galison, *L'empire du temps. Les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré*, Éditions Robert Laffont, Paris, 2005.

P. Gautier Dalché, Les représentations de l'espace en Occident de l'Antiquité tardive au XVIe siècle, Annuaire de l'École Pratique des Hautes Études, Section des Sciences Historiques et Philologiques, 139 (2008) 119-123.
http ://ashp.revues.org/index356.html

É. Ghys, Géométriser l'espace : de Gauss à Perelman, dans *Images des Mathématiques*, 17 novembre 2007.
http ://images.math.cnrs.fr/Geometriser-l-espace-de-Gauss-a.html

B. Gille éd., *Histoire des techniques*, Encyclopédie de la Pléiade, Éditions Gallimard, Paris, 1978.

P. Girardin, Le procès de la Carte de France. À propos de la cartographie alpine, Annales de Géographie, 17 (no. 34) (1908) 289-301.

J. Goguel, *La gravimétrie*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 1030, Presses Universitaires de France, Paris, 1963.

J. Goguel éd., *Géophysique*, Encyclopédie de la Pléiade, Éditions Gallimard, Paris, 1971.

A. Gougenheim, Calcul des coordonnées astronomiques et géodésiques, méthode du point approché, dans *Troisième Centenaire de l'Académie des Sciences*, Gauthier-Villars, Paris, 1967, Tome 1, pp. 345-350.

F. Graber, Le nivellement, une mesure pour l'action autour de 1800, Histoire & Mesure, 21 (2006) 29-54.

D. Guedj, *Le Mètre du Monde*, Éditions du Seuil, Paris, 2000.

P. Guichonnet, Tracés et contextes de la traversée des Alpes au cours des siècles, dans *Traverser les Alpes, 2000 ans d'histoire*, Catalogue de l'exposition, Espace Tairraz, Chamonix-Mont-Blanc, 21 décembre 2002-21 septembre 2003, pp 55-79.

A. Guillemin, *Éléments de cosmographie*, Hachette et Cie, Paris, 1891.

R. Guimarães, *Sur la vie et l'œuvre de Pedro Nuñes*, Imprimerie de l'université, Coimbra, 1915.

R. Hahn, *Le Système du monde. Pierre Simon Laplace. Un itinéraire dans la science*, Éditions Gallimard, Paris, 2004.

É. Hébert éd., *Instruments scientifiques à travers l'histoire*, Ellipse, Paris, 2004.

C. Hofmann et al., *Le Globe et son image*, Bibliothèque Nationale de France, Paris, 1995.

A. von Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du Monde*, Charles Turati, Milan, 1846-1861.

S. Jodra, La forme et les dimensions de la Terre. L'histoire de la géodésie.
http ://www.cosmovisions.com/geodesieChrono.htm, 2004.

P. Joutard, *L'invention du Mont Blanc*, Éditions Gallimard/Julliard, Paris, 1986.

M.-F. Jozeau, *Géodésie au XIXe Siècle. De l'hégémonie française à l'hégémonie allemande. Regards belges. Compensation et méthode des moindres carrés*, Thèse, Université de Paris 7, 1997.

H.A. Kastrup, On the advancements of conformal transformations and their associated symmetries in geometry and theoretical physics, Annalen der Phys., 17 (2008) 631-690.
Voir : arXiv :0808.2730v1 ou
www-library.desy.de/preparch/desy/2008/desy08-107.ps.gz

M. Kennedy, S. Kopp, Comprendre les projections,
http ://laeti.perrierbrusle.free.fr/projections_ESRI.pdf

L. Lagarde, *Vocabulaire de la topographie*, Hachette, La Maison du dictionnaire, Paris, 1980.

J. Lefort, *L'Aventure cartographique*, Belin, Paris, 2004.

J. Lequeux, *François Arago, un savant généreux. Physique et astronomie au XIXe siècle*, EDP Sciences, Les Ullis, 2008.

A. Leroi-Gourhan éd., *Les explorateurs célèbres*, Éditions d'Art Lucien Mazenod, Paris, 1947.

J.J. Levallois, *Mesurer la Terre. 300 ans de géodésie française. De la toise du Châtelet au satellite*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussée, Paris, 1988.

A. Libault, *La cartographie*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 937, Presses Universitaires de France, Paris, 1972.

C.M. Linton, Two astronomical anniversaries, Mathematics Today, February 2009, 22-26.

R. Locqueneux, *Henri Bouasse. Réflexions sur les méthodes et l'histoire de la physique*, L'Harmattan, Paris, 2009.

M. Luque, G. Matarazzo, Projection Collignon à méridiens et parallèles rectilignes. http ://melusine.eu.org/syracuse/mluque/mappemonde/Collignon.pdf

A.M. MacEachren, The evolution of thematic cartography. A research methodology and historical review, The Canadian Cartographer, 16 (1979) 17-33.

R. Maillard, A. Millet, *Cosmographie*, Hachette, Paris, 1953.

L. Maison, *Les instruments anciens d'astronomie, histoire et enjeux actuels de leur mise en exposition*, Mémoire de DEA, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 2000.
http ://www.episteme.u-bordeaux.fr/publications_maison/DEA.pdf

J.-L. Margot-Duclot, *La France à l'échelle : histoire de la cartographie*, Solar, Paris, 1978.

G. Menzies, *1421, l'année où la Chine a découvert l'Amérique*, Éditions Intervalles, Paris, 2007.

P. Merlin, *La topographie*, Collection Que-Sais-Je ?, vol. 744, 2e édition, Presses Universitaires de France, Paris, 1972.

F. Messineo, *Observer le Soleil et la Lune*, Éditions Ellipses, Paris, 2008.

F. Meyrier, *Introduction au principe de la droite de hauteur*, Cours non publié.

H. Michea, De l'utilisation du martelloios ou rose des vents au Moyen Âge.
http ://pagesperso-orange.fr/hubert.michea/marteloire.html

G. Modica, Patience dans l'azur, Paul Helbronner, Montagnes Magazine, 309 (2006) 80-83.

P. Monier, *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie*, Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1997.
http ://recherche.ign.fr/labos/cogit/pdf/THESES/sc monier/These_Monier.pdf

J. Mokre, *The Globe Museum of the Austrian National Library*, Peter E. Allmayer-Beck, Bibliophile Edition, Vienna.

J. Needham, *Science and civilisation in China*, Cambridge University Press, Cambridge, 1959.

F.-J.-M. Noël, M. Carpentier, *Nouveau dictionnaire des origines, inventions et découvertes...*, Janet et Cotelle, Paris, 1827.

M. Obregòn, *Ulysse et Magellan...*, Éditions Autrement, Paris, 2003.

I. Passeron, « Savoir attendre et douter » : l'article « Figure de la Terre », Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie, RDE, 21 (1996) 131-144.
http ://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/36/23/31/PDF/
Rde-21.pdf.

M. Pelletier, *Cartographie de la France et du monde de la Renaissance au Siècle des Lumières*, Bibliothèque Nationale de France, Paris, 2001.

M. Pelletier, Les Amériques, de la découverte à la cartographie de Martin Waldseemüller à Guillaume Delisle du 16e au 18e siècle, dans *Les géographes redécouvrent les Amériques*, Actes du Festival International de Géographie, G. Dorel éd., Saint-Dié, 2006.
http ://fig-st-die.education.fr/actes/actes_2006/pelletier/
article.htm

M. Pelletier, H. Ozanne, *Portraits de la France. Les cartes, témoins de l'histoire*, Hachette/Bibliothèque Nationale de France, Paris, 1995.

G. Perrier et al., *Conférences sur les méthodes et le procédés de géodésie, de topographie et de cartographie en usage au Service Géographique de l'Armée*, Imprimerie du Service Géographique, Paris, 1912-1913.

G. Perrier, *Petite histoire de la géodésie*, Alcan, Presses Universitaires de France, Paris, 1939.

H. Pigaillem, *Le Prince Eugène, 1663-1736*, Éditions du Rocher, Paris, 2005.

P. Pizzetti, H. Noirel, Géodésie, dans *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, Édition Française, J. Molk et Ch. Lallemand éds., Tome VI, Volume 1, Gauthier-Villars et Cie, Paris et B.G. Teubner, Leipzig, 1916, réédition par Jacques Gabay, Paris, 1993.

A. Poignant, Antoine d'Abbadie : explorateur scientifique. http ://hedatuz.euskomedia.org/3964/1/04135146.pdf

J.-P. Poirier, *Antoine d'Abbadie. Voyageur et physicien du globe au XXe siècle*, Hermann, Paris, 2009.

M. Prévot, *Cours de tachéométrie*, 4e édition, École Spéciale des Travaux Publics, Paris, 1920.

P. Pinon, B. Le Boudec, *Les plans de Paris. Histoire d'une capitale*, BNF, Paris, 2004.

D. Puille, *Cours complet d'arpentage élémentaire théorique et pratique*, Librairie Classique de Ch. Fouraut, Paris, 1852.

J. Randier, *L'instrument de marine*, Éditions Babouji, La Falaise, 2006.

G. Rébuffat, *Mont-Blanc, jardin féérique*, Librairie Hachette, Paris, 1962.

Y. Ricard et al., Comment déterminer le géoïde au-dessus des continents ?
http ://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre /metadata/LOM-geoide-continental2.x

A. Ronsin, *La fortune d'un nom, America. Le baptême du Nouveau Monde à Saint-Dié-des-Vosges*, Éditions Jérôme Millon, Grenoble, 1991.

A. Ronsin, *Le nom de l'Amérique. L'invention des chanoines et savants de Saint-Dié*, Éditions La Nuée Bleue/DNA, Strasbourg, 2006.

L. Russo, *The forgotten revolution*, Springer-Verlag, Berlin, 2004.

J.-F. Salneuve, *Cours de topographie et de géodésie*, Librairie Militaire J. Dumaine, Paris, 1869.

B. Salway, The nature and genesis of the Peutinger map, Imago Mundi, 57, Part 2, (2005) 119-135.

H.-B. de Saussure, *Journal de l'ascension du Mont-Blanc*, Éditions Guérin, Chamonix, 2007.

D. Savoie, *Cosmographie*, Belin, Paris, 2006.

E. Schatzman éd., *Astronomie*, Encyclopédie de la Pléiade, Éditions Gallimard, Paris, 1962.

M. Schiavon, *Itinéraires de la précision. Géodésiens, artilleurs, savants et fabricants d'instruments en France, 1870-1930 (environ)*, Thèse, EHESS, Paris, 2003.

M. Schiavon, Les officiers géodésiens du Service géographique de l'armée et la mesure de l'arc de méridien de Quito (1901-1906), Histoire & Mesure, 21 (2006) 55-93.

M. Serres, Gnomon : les débuts de la géométrie en Grèce, dans M. Serres éd., *Éléments d'histoire des sciences*, Larousse-Bordas, Paris, 1997.

P. Sillard, *Les projections et référentiels cartographiques*, Cours de l'École Nationale des Sciences Géographiques, 2000.
http ://www.ensg.ign.fr/FAD/FAD_PDF/Math.pdf/projections.pdf

D. Sobel, *Longitude*, J.-C. Lattès, Paris, 1996.

F. Soso, Ératosthène, la Géographie et la mesure du méridien terrestre, 2003.
http ://fsoso.free.fr/conferences/confer4/DOCS/EratosteneItFr.htm

G.G. Szpiro, *La conjecture de Poincaré. Comment Grigori Perelman a résolu l'une des plus grandes énigmes mathématiques*, J.C. Lattès, Paris, 2007.

R.J.A. Talbert, *Rome's world : The Peutinger map reconsidered*, Cambridge University Press, Cambridge, à paraître, 2010.

P. Tardi, L'œuvre de l'Académie des Sciences dans la détermination de la forme et des dimensions de la Terre, dans *Troisième centenaire de l'Académie des Sciences*, Gauthier-Villars, Paris, 1967, Tome 1, pp. 307-330.

R. Taton, *Histoire générale des sciences*, 4 volumes, Presses Universitaires de France, Paris, 1994.

O. Taussky, J. Todd, Cholesky, Toeplitz and the triangular factorization of symmetric matrices, Numer. Algorithms, 41 (2006) 197-202.

J. Tulard, *Napoléon. Les grands moments d'un destin*, Librairie Arthème Fayard, Paris, 2006.

A. Vienne, *Éléments d'astronomie fondamentale*, Cours polycopié, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2008.

E. Weber, *Tabula Peutingeriana. Codex Vindobonensis 324. Kommentar*, Akademische Druck-u. Verlagsanstalt, Graz, 1976.

D. Wigal, *Anciennes cartes marines*, Sirrocco, London, 2006.

C.W. Wirtz, G. Fayet, Détermination de la longitude et de la latitude, dans *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, Édition Française, J. Molk et H. Andoyer éds., Tome VII, Volume 1, Gauthier-Villars et Cie, Paris et B.G. Teubner, Leipzig, 1916, réédition par Jacques Gabay, Paris, 1993.

S. Zweig, *Magellan*, Bernard Grasset, Paris, 1938.

S. Zweig, *Amerigo. Récit d'une erreur historique*, Belfond, Paris, 1992.

Table des matières

Autres titres de la collection Acteurs de la Science :

Jean-Pierre Renau, *Eugène Woillez (1811-1882), le véritable auteur du poumon d'acier*, Préface du Dr Pouliquen, 2008.
Roger Teyssou, *Dictionnaire mémorable des remèdes d'autrefois*, Préface de Richard Moreau, 2007.
Michel Cointat, *Florian 1755-1794. Aspects méconnus de l'auteur de Plaisir d'amour*, 2007.
Claude Brezinski, *Comment l'esprit vient aux savants*, 2007.
Pierre Bayart, *La Méridienne de France. Et l'aventure de sa prolongation jusqu'aux Baléares*, Préface de Jean-Claude Pecker, 2007.
Serge Boarini, *Introduction à la casuistique*, 2007.
Agnès Traverse, *Le projet Soleil. Chronique et analyse d'un combat*, 2007.
Shefqet Ndroqi, *Une vie au service de la vie. Mémoires d'un médecin albanais (1914-1997)*, Adaptation française et présentation par Jean-Paul Martineaud, 2007.
Ludovic Bot, *Philosophie des sciences de la matière*, 2007.
Jean Maimbourg, *Balta, aventurier de la peste. Professeur Marcel Baltazard. 1908-1971*, Préface de Jean-Michel Alonso et de Henri-Hubert Mollaret, 2007.
Général d'armée Jean-Pierre Kelche, Grand Chancelier de la Légion d'honneur (sous la présidence de), *Les Maisons d'éducation de la Légion d'honneur. Deux siècles d'apport à l'instruction et à l'éducation des jeunes filles*, Actes du Colloque organisé à l'occasion du Bicentenaire des Maisons d'éducation de la Légion d'honneur, Saint Denis, 5 avril 2006, paru 2007.
Jean-Paul Martineaud, *De Vincent de Paul à Robert Debré. Des enfants abandonnés et des enfants malades à Paris*, 2007.
Joseph Averous, *Sur mer et au delà des mers. La vie d'une jeune médecin de Marine, 1888-1904*, Préface de Jean Kermarec, 2006.
André Krzywicki, *Un improbable chemin de vie*, 2006.
Joseph Averous, *Marie-Joseph Caffarelli (1760-1845), Préfet maritime à Brest sous le Consulat et l'Empire*, 2006.
Claude Brezinski, *Histoires de sciences. Inventions, découvertes et savants*, 2006.
Paul Germain, *Mémoire d'un scientifique chrétien*, 2006.
Marc de Lacoste-Lareymondie, *Une philosophie pour la physique quantique*, 2006.
Jean-Paul Moreau, *Un Pasteurien sous les tropiques*, 2006.
André Audoyneau, *Le Docteur Albert Schweitzer et son hôpital à Lambaréné. L'envers d'un mythe*, 2005.
Jacques Verdrager, *L'OMS et le paludisme. Mémoires d'un médecin spécialiste de la malaria*, 2005.
Christian Marais, *L'âge du plastique*. Préface de Pierre-Gilles de Gennes, 2005.
Jean Perdijon, *Einstein, la relativité et les quanta*, 2005.

Lucienne Félix, *Réflexion d'une agrégée de mathématiques au XXème siècle*, 2005.

Lise Brachet, *Le professeur Jean Brachet, mon père*, 2004.

Jacques Risse, *Les professions médicales en politique (1875-2002)*, 2004.

Patrice Pinet, *Pasteur et la philosophie*, 2004.

Jean Defrasne, *Histoire des Associations françaises*, 2004.

Pierre Schuller, *La face cachée d'une vocation*, 2004.

François Du Mesnil du Buisson, *Penser la recherche. L'exemple de physiologie animale*, 2003.

Michel Cointat,*Le Moyen Âge moderne : scènes de la vie quotidienne au XXème siècle*, 2003.

Robert Sigalea, *Johann-Martin Hongberger, médecin et aventurier de l'Asie*, 2003.

Philippe Caspar (sous la dir. de),*Maladies sexuellement transmissibles. Sexualité et institutions*, 2003.

Yvon Houdas, *La Médecine arabe aux siècles d'or, VIII-XIIIèmes siècles*, 2003.

Daniel Penzac, *Docteur Adrien Proust. Père méconnu précurseur oublié*, 2003.

Richard Moreau, *Louis Pasteur. Besançon et Paris : l'envol*, 2003.

Richard Moreau, *Les deux Pasteur, le père et le fils, Jean-Joseph Louis Pasteur (Dole, Marnoz, Arbois)*, 2003.

M. Heyberger, *Santé et développement économique en France au XIXème siècle. Essai d'histoire anthropométrique*, 2003.

Jean Boulaine et Richard Moreau, *Olivier de Serres et l'évolution de l'agriculture moderne*, 2003.

Claude Vermeil, *Médecins nantais en Outre-Mer (1962-1985)*, 2003.

Richard Moreau et Michel Durand-Delga, *Jules Marcou (1824-1898), précurseur français de la géologie nord-américaine*, 2002.

Roger Teyssou, *La Médecine à la Renaissance, et évolution des connaissances, de la pensée médicale, du quatorzième siècle au dix-neuvième siècle en Europe*, 2002.

Jacqueline Bonhamour, Jean-Marc Boussard (sous la dir. de),*Agriculture, régions et organisation administrative. Du global au local. Colloque de l'Académie d'Agriculture de France*, 2002.

Pierre Pignot, *Les Anglais confrontés à la politique agricole commune ou la longue lutte des Britanniques contre l'Europe des Pères fondateurs*, 2002.

Michel Cointat, *Histoires de fleurs*, 2001. Préface de Richard Moreau.

Jean Roy, *Histoire d'un siècle de lutte anti-acridienne en Afrique. Contributions de la France*, 2001.

Serge Nicolas, *La mémoire et ses maladies selon Théodule Ribot*, 2001.

Michel Cointat, *Les Couloirs de l'Europe.* Préface de Richard Moreau, 2001.

Paulette Godard, *Souvenirs d'une universitaire rangée. Une vocation sous l'éteignoir.* Préface de Richard Moreau, 2001.

Michel Cointat, *Rivarol (1753-1801) Un écrivain controversé*, 2001.
Jean-Pierre Gratia, *Les premiers artisans belges de la microbiologie et les débuts de la Biologie moléculaire*. Préface de Richard Moreau, 2001.
Jean-Pierre Dedet, *Histoire des Instituts Pasteur d'Outre-Mer*, 2000.
Richard Moreau, *Préhistoire de Pasteur*, 2000.

L'HARMATTAN, ITALIA
Via Degli Artisti 15 ; 10124 Torino

L'HARMATTAN HONGRIE
Könyvesbolt ; Kossuth L. u. 14-16
1053 Budapest

L'HARMATTAN BURKINA FASO
Rue 15.167 Route du Pô Patte d'oie
12 BP 226
Ouagadougou 12
(00226) 76 59 79 86

ESPACE L'HARMATTAN KINSHASA
Faculté des Sciences Sociales,
Politiques et Administratives
BP243, KIN XI ; Université de Kinshasa

L'HARMATTAN GUINÉE
Almamya Rue KA 028
En face du restaurant le cèdre
OKB agency BP 3470 Conakry
(00224) 60 20 85 08
harmattanguinee@yahoo.fr

L'HARMATTAN CÔTE D'IVOIRE
M. Etien N'dah Ahmon
Résidence Karl / cité des arts
Abidjan-Cocody 03 BP 1588 Abidjan 03
(00225) 05 77 87 31

L'HARMATTAN MAURITANIE
Espace El Kettab du livre francophone
N° 472 avenue Palais des Congrès
BP 316 Nouakchott
(00222) 63 25 980

L'HARMATTAN CAMEROUN
BP 11486
Yaoundé
(00237) 458 67 00
(00237) 976 61 66
harmattancam@yahoo.fr